

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA**

**DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**  
**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**DISEÑO DE UNA HOJA DE CÁLCULO  
PARA EL ESTUDIO DE INSTALACIONES  
ELÉCTRICAS**

**AUTOR:** Cristina Martín Fidalgo

**TUTOR:** Esteban Domínguez González-Seco

**DIRECTOR:** José Manuel Nieto Saturio

Leganés, Julio de 2014



# 1. Índice

---

<b>1. Índice</b>	<b>3</b>
<b>2. Resumen</b>	<b>9</b>
<b>3. Planteamiento del proyecto</b>	<b>11</b>
3.1 Introducción	11
3.2 Planteamiento	12
3.3 Objetivos	13
3.4 Alcance	14
3.5 Estructura del proyecto	15
3.6 Definiciones	16
3.6.1 Sistema de Puesta a Tierra	16
3.6.2 Corriente de Máxima de Puesta a Tierra	16
3.6.3 Elevación del Potencial del Suelo (GPR)	16
3.6.4 Tensión de Contacto	16
3.6.5 Tensión de Paso	16
3.6.6 Tensión de Malla	17
3.6.7 Tensión de Servicio	17
3.6.8 Tensión de Contacto Metal con Metal	17
3.6.9 Electrodo de Tierra	17
3.6.10 Malla de Tierra	17
3.6.11 Subestación	18
3.6.12 Zona de protección	18
<b>4. Conceptos generales sobre una Puesta a Tierra</b>	<b>19</b>
4.1 Procedimiento de instalaciones de Puesta a Tierra	19
4.1.1 Elementos de las instalaciones y condiciones de montaje	19
4.1.2 Líneas de tierra	20
4.1.3 Instalación de líneas de tierra	20
4.1.4 Electrodo de Puesta a Tierra	20
4.2 Características del suelo y de los electrodos	21
4.2.1 Resistividad del terreno	21
4.2.2 Humedad	21
4.2.3 Temperatura	22
4.2.4 Salinidad	22
4.3 Medida de la Resistividad	22
4.3.1 Método de los Dos Electrodos	23
4.3.2 Método de los Cuatro Electrodos	24
4.3.3 Método Wenner	25
4.3.4 Seguridad	26
4.4 Vigilancia de las instalaciones de Puesta a Tierra	27
	3

<b>4.5</b>	<b>Efecto de la Corriente en el Cuerpo Humano</b>	<b>27</b>
4.5.1	Principales factores que influyen en el efecto eléctrico	30
4.5.1.1	Intensidad de la corriente	30
4.5.1.2	Duración del contacto eléctrico	31
4.5.1.3	Impedancia del cuerpo humano	31
<b>4.6</b>	<b>Índice de parámetros</b>	<b>32</b>
<b>5.</b>	<b><i>Procedimiento de Diseño de la Hoja de Cálculo</i></b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Primer Paso: Cálculo de la Resistividad del Terreno</b>	<b>35</b>
5.1.1	Modelo de Resistividad Uniforme	35
5.1.2	Modelo Bicapa	36
5.1.2.1	Método de Sundae	36
<b>5.2</b>	<b>Segundo Paso: Cálculo de la Sección del Conductor</b>	<b>37</b>
5.2.1	Corrientes asimétricas	39
<b>5.3</b>	<b>Tercer Paso: Diseño Inicial</b>	<b>40</b>
<b>5.4</b>	<b>Cuarto Paso: Cálculo de la Tensión de Paso y de Contacto</b>	<b>41</b>
5.4.1	Método IEEE 80-2000	42
5.4.1.1	Ecuaciones de Dalziel's y la Curva de Biegelmeier's	43
5.4.2	MIE-RAT 13	44
<b>5.5</b>	<b>Quinto Paso: Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra</b>	<b>46</b>
5.5.1	Mallado Conductores (sin picas)	46
5.5.2	Combinación de Conductores y Picas	46
5.5.2.1	Resistencia de Puesta A Tierra de los conductores enterrados	46
5.5.2.2	Resistencia de Puesta a Tierra de las picas	47
5.5.2.3	Resistencia Mutua entre los conductores y las picas	47
5.5.2.4	Resistencia de puesta a tierra de todo el sistema	47
5.5.2.5	Coeficientes $k_1$ y $k_2$	47
5.5.2.6	Curvas de Schwartz	48
5.5.2.7	Fórmulas de Kerckel	48
<b>5.6</b>	<b>Sexto Paso: Cálculo de la Corriente de Falta <math>I_G</math></b>	<b>49</b>
5.6.1	Falta Monofásica a Tierra	50
5.6.2	Falta Bifásica a Tierra	51
5.6.3	Cálculo de las Impedancias de Secuencia Directa, Inversa y Homopolar	52
5.6.3.1	Secuencia directa	52
5.6.3.2	Secuencia inversa	53
5.6.3.3	Secuencia homopolar	53
5.6.4	Cálculo de $S_f$	54
5.6.5	Cálculo de la Máxima Corriente que entra en la Malla $I_G$	54
<b>5.7</b>	<b>Séptimo Paso: Cálculo del GPR (Ground Potential Rise)</b>	<b>54</b>
<b>5.8</b>	<b>Octavo Paso: Cálculo de la Máxima Tensión de Contacto y de Paso</b>	<b>55</b>
5.8.1	Máxima Tensión de Contacto ( $E_m$ )	55
5.8.2	Tensión de Paso	56
<b>5.9</b>	<b>Noveno Paso: Comprobación del Diseño</b>	<b>57</b>
<b>6.</b>	<b><i>Manual de la Hoja de Cálculo</i></b>	<b>58</b>

<b>6.1</b>	<b>Paso 0. Datos de Entrada</b>	<b>58</b>
<b>6.2</b>	<b>Paso 1. Resistividad del Terreno</b>	<b>59</b>
<b>6.3</b>	<b>Paso 2. Cálculo de la Sección del Conductor</b>	<b>60</b>
<b>6.4</b>	<b>Paso 3. Diseño Inicial</b>	<b>61</b>
<b>6.5</b>	<b>Paso 4. Cálculo de <math>E_{\text{touch}}</math> y <math>E_{\text{step}}</math> Admisibles</b>	<b>64</b>
<b>6.6</b>	<b>Paso 5. Resistencia de Puesta a Tierra</b>	<b>65</b>
<b>6.7</b>	<b>Paso 6. Corriente de Falta <math>I_g</math> y Máxima Elevación del Potencial de la Malla (GPR)</b>	<b>66</b>
<b>6.8</b>	<b>Paso 7. Tensión de Contacto y Tensión de Paso de la Malla. <math>E_m</math> y <math>E_s</math></b>	<b>68</b>
<b>6.9</b>	<b>Paso 8. Validación</b>	<b>69</b>
<b>7.</b>	<b><i>Aplicación Real de la Hoja de Cálculo</i></b>	<b>70</b>
<b>7.1</b>	<b>Datos de Entrada</b>	<b>70</b>
7.1.1	Datos del Diseño	70
7.1.2	Datos Resistividad	71
7.1.3	Datos de la Línea de Distribución	72
7.1.4	Planos	73
<b>7.2</b>	<b>Cálculos con la Hoja de Cálculo</b>	<b>73</b>
7.2.1	Resistividad del Terreno	73
7.2.2	Cálculos del conductor	74
7.2.3	Diseño Inicial	75
7.2.4	Tensiones de Paso y de Contacto	77
7.2.5	Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra	78
7.2.6	Corriente de Falta y Máximo Potencial en la Malla	80
7.2.7	Tensión Máxima de Contacto y de Paso en el Interior de la Malla	80
7.2.8	Validación	81
<b>7.3</b>	<b>Cálculos con ETAP</b>	<b>82</b>
7.3.1	Resultados ETAP	85
<b>7.4</b>	<b>Comparativa de Resultados</b>	<b>86</b>
<b>7.5</b>	<b>Modificación del Diseño Inicial</b>	<b>87</b>
7.5.1	Modificación con ETAP	87
7.5.2	Modificación con la Hoja de Cálculo	89
7.5.3	Comparativa de resultados	92
<b>8.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b>	<b>94</b>
<b>9.</b>	<b><i>Bibliografía</i></b>	<b>95</b>
<b>10.</b>	<b><i>Anexos</i></b>	<b>96</b>
<b>10.1</b>	<b>Anexo 1</b>	<b>96</b>
<b>10.2</b>	<b>Anexo 2</b>	<b>99</b>





## Agradecimientos

El primer agradecimiento es para mi madre, la persona que ha sido el pilar de mi vida durante estos años, la persona que me ha enseñado a luchar y ser fuerte. Agradecerle la oportunidad que me ha dado de poder estudiar la carrera que yo elegí. A mi hermano, futuro Ingeniero, por ser el único de la familia que entiende y vive mi esfuerzo. Álvaro gracias por comprenderme. A mi abuela, que siempre quiso verme con una carrera terminada, esto va por ti. A mi pareja durante todos estos años, gracias por tu apoyo, cariño y paciencia.

También agradecer a la propia Universidad Carlos III la enseñanza que me ha dado tanto a nivel intelectual como a nivel personal. A mis compañeros “Perdidos por el mundo”. Y a los amigos de fuera de la universidad, gracias por vuestra paciencia.

Gracias a mis tutores Esteban Domínguez González-Seco y José Manuel Nieto Saturio por su dedicación y confianza y por dejarme formar parte de esta empresa. A Carolina, por ser la persona que día a día me ha ayudado.





## 2. Resumen

---

Este Proyecto de Fin de Carrera se centra en la comparación de una Hoja de Cálculo con el programa de cálculos eléctricos ETAP. La comparación se centrará en los cálculos de Puesta a Tierra de instalaciones y subestaciones eléctricas.

Para hacer dicha comparación, se estudiarán y analizarán las Normativas vigentes sobre Puesta a Tierra

Dados los datos de la línea de distribución, se introducirán en nuestra Hoja de Cálculo y ésta nos dirá si es un diseño correcto o hay que modificarlo. Podremos elegir el tipo de diseño inicial de nuestra Puesta a Tierra. La Hoja de Cálculo nos permite visualizar de dónde salen algunos parámetros de estudio y elegir el tipo de Normativa que queremos aplicar

Una vez tengamos estos resultados, realizaremos la misma operación con el ETAP, que nos permite visualizar la malla de tierra que hemos creado.

Una vez tengamos los dos tipos de resultados, se trata de hacer una comparación entre ambos métodos y ver si nuestra Hoja de Cálculo es válida.



## 3. Planteamiento del proyecto

---

### 3.1 Introducción

La trascendencia de la ingeniería de Puesta a Tierra radica en procurar seguridad para las personas que se encuentren en la instalación electrotécnica o en sus cercanías durante el eventual traspaso de corriente hacia la tierra, debido a una falta en el sistema eléctrico, o a descargas atmosféricas.

También busca la optimización de costes asociados a los recursos necesarios para la construcción de las instalaciones de Puesta a Tierra y como consecuencia, el de la instalación electrotécnica global donde esté emplazada.

El sistema de Puesta a Tierra debe ser diseñado teniendo en cuenta las exigencias de seguridad basadas, principalmente, en las recomendaciones de la electrofisiología del trabajo, así como en los reglamentos y normas establecidos al respecto.

En este proyecto se ha planteado una solución práctica a la problemática del diseño de la Puesta a Tierra en una subestación, esto es, la elaboración de una Hoja de Cálculo basada en la Norma IEEE Std. 80-2000. “*Guide for Safety in AC Substation Grounding*” que permite obtener, de forma sencilla, el diseño de cualquier Puesta a Tierra de una subestación eléctrica considerando, en todo momento, los límites que impone la citada Norma.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la Hoja de Cálculo, se ha supuesto un caso real para diseñar una Puesta a Tierra. Los resultados obtenidos por la herramienta creada en este proyecto, se han comparado con los valores determinados por el ETAP Power System 12.0.0, (“Electrical Transient Analyzer Program”). El ETAP es un programa de ingeniería eléctrica muy potente y completo, capaz de analizar y deducir el diseño más adecuado de una Puesta a Tierra, bajo los criterios de la Norma Internacional anteriormente comentada.

## 3.2 Planteamiento

El presente Proyecto Final de Carrera surge con el propósito de evitar daños serios a personas y equipos prematuramente a causa de un inapropiado sistema de tierra. Con motivo de la problemática que ofrece este tipo de instalación eléctrica, se ha hecho un manual para el diseño de Puestas a Tierra en subestaciones y sistemas eléctricos, el cual está orientado a identificar los métodos más detallados y específicos para un correcto diseño.

La red de tierra sirve, principalmente, para proteger a las personas que se encuentran dentro de ella como en sus alrededores y para la protección de los equipos que se encuentran dentro de la misma.

La instalación incorrecta de un sistema de Puesta a Tierra implica desde lesiones menores hasta la muerte de una persona, lo mismo que operaciones erráticas o daños costosos o irreparables en los equipos y en las instalaciones. Los errores en el sistema de Puesta a Tierra representan un peligro de seguridad industrial.

Su forma de cálculo se basa en el rango de corriente, el límite de corriente tolerable por el cuerpo, circuito de tierra accidental y sobre todo el criterio de las tensiones admisibles (tensión de contacto y de paso).

El diseño de Puesta a Tierra en subestaciones se debe realizar de manera tal, que limite el efecto del gradiente de potencial a tierra para no poner en peligro la seguridad de las personas o equipos bajo condiciones normales de falta.

### 3.3 Objetivos

El presente Proyecto tiene como objetivo la realización de una Hoja de Cálculo capaz de realizar un correcto diseño de un sistema de Puesta a Tierra para las subestaciones y sistemas eléctricos. Es una herramienta para entender y poder aplicar, de manera correcta, la Norma IEEE Std. 80-2000 “*Guide for Safety in AC Substation Grounding*”.

Los objetivos específicos que se han querido conseguir en este proyecto son:

- Conocer las normas y prácticas recomendadas para el diseño de sistemas de Puesta a Tierra. Principalmente las Normas IEEE 80-2000 y MIE-RAT 13.
- Estudiar las bases y criterios de diseño del Proyecto. Esto es, establecer como base para el diseño, los límites seguros de las diferencias de potencial que pueden existir en una subestación y sistemas eléctricos en condiciones de falta, en los puntos que puedan entrar en contacto con el cuerpo humano.
- Realizar un manual que indique todos los procedimientos a seguir para el diseño de sistemas de Puesta a Tierra basados en la Norma Internacional.
- Aplicación real de la herramienta creada en el Proyecto.
- Uso de programa computacional de ingeniería eléctrica ETAP como método para comprobar los resultados obtenidos.

## 3.4 Alcance

El Proyecto está relacionado, principalmente, con subestaciones exteriores de corriente alterna, ya sean convencionales o con aislamiento de gas. Se incluyen subestaciones de distribución, transmisión y plantas de generación.

Con el cuidado adecuado, los métodos que se describen también se aplican a las partes interiores de tales subestaciones o a las subestaciones que están totalmente en el interior.

Los problemas específicos de las subestaciones de corriente continua y el análisis cuantitativo de los efectos de las descargas eléctricas están fuera del alcance del Proyecto.

Al igual que la Norma IEEE Std. 80-2000, la Hoja de Cálculo sirve como diseño inicial (estudio preliminar) del diseño de la Puesta a Tierra ya que presenta límites impuestos por la Norma. Estas restricciones del estudio se muestran a continuación:

- Sólo permite analizar configuraciones de la malla regularmente reticuladas
- Sólo admite modelos de terrenos homogéneos
- La profundidad del electrodo debe de estar entre 0,25 y 2,5m
- El número máximo de conductores en una dirección es 25
- Sólo permite obtener las tensiones de paso y de contacto máximas en toda la malla. Es decir, la herramienta no está capacitada para obtener valores de tensión de paso y de contacto en un punto concreto del mallado.
- No considera la proximidad de otros sistemas de Puesta a Tierra

## 3.5 Estructura del proyecto

Este Proyecto Final de Carrera se ha estructurado en varios capítulos.

El Capítulo I es el índice del Proyecto. EL Capítulo II es un breve resumen del mismo.

El Capítulo III presenta el planteamiento del proyecto, los objetivos que se han conseguido en el proyecto, así como su alcance y la estructura de la que se compone. Además se incluye un breve diccionario donde se definen los términos fundamentales relacionados con la Puesta a Tierra.

El Capítulo IV muestra los conceptos teóricos generales de las instalaciones de Puesta a Tierra. Estos conceptos abarcan desde los procedimientos de instalación y las características necesarias para ello, hasta la seguridad que implica para las personas.

El Capítulo V engloba los procedimientos que se han aplicado para elaborar la Hoja de Cálculo paso a paso. Incluye los criterios seleccionados y todos los cálculos realizados.

El Capítulo VI surge con el propósito de entender la Hoja de Cálculo. Aquí se explica fácilmente cómo usar dicha Hoja.

El Capítulo VII es una aplicación real de la Hoja de Cálculo, explicada en los capítulos anteriores. Se ha realizado el posible diseño que debe de tener la instalación de Puesta a Tierra de una subestación de una planta de generación eléctrica. Los resultados son comprobados con un programa de Ingeniería Eléctrica para garantizar así la veracidad de las conclusiones obtenidas.

Finalmente, en el Capítulo VIII se extraen las conclusiones obtenidas del estudio.

Por último, en los capítulos IX y X se incluye la bibliografía y una serie de anexos adicionales a los datos experimentales.

## **3.6 Definiciones**

### **3.6.1 Sistema de Puesta a Tierra**

Es un sistema, circuito o aparato provisto de una tierra con el propósito de establecer un circuito de retorno a tierra y mantener su potencial casi igual al potencial del planeta Tierra.

### **3.6.2 Corriente de Máxima de Puesta a Tierra**

Máxima corriente que atraviesa al sistema de Puesta a Tierra cuando ocurre una falta en la instalación.

### **3.6.3 Elevación del Potencial del Suelo (GPR)**

Máximo potencial eléctrico que en una subestación con un sistema de Puesta a Tierra puede alcanzar, relativo a una distancia de un punto puesto a tierra que se asume como el potencial de tierra remoto. Esta tensión, GPR, es igual al producto de la máxima corriente de puesta a tierra y de la resistencia de puesta a tierra de dicha instalación.

Bajo condiciones normales, el equipo eléctrico puesto a tierra opera a potencial de tierra cercano a cero. Durante una falta a tierra, la parte de la corriente de falta que es conducida por la malla de puesta a tierra hacia la tierra causa el incremento del potencial de tierra con respecto a la tierra remota.

### **3.6.4 Tensión de Contacto**

Es la máxima diferencia de potencial tolerable entre cada punto sobre la superficie del terreno, donde una persona pueda encontrarse de pie y cada punto que pueda ser tocado simultáneamente por una de sus manos.

### **3.6.5 Tensión de Paso**

Es la máxima diferencia de potencial tolerable entre dos puntos de la superficie del terreno que puedan ser tocados simultáneamente por los pies de un individuo separados un metro de distancia, sin tocar ningún otro objeto puesto a tierra.



### **3.6.6 Tensión de Malla**

Es la tensión máxima de contacto que puede haber dentro de una malla de Puesta a Tierra.

### **3.6.7 Tensión de Servicio**

Es el valor de la tensión que realmente existe en un punto cualquiera de una instalación en un momento determinado.

### **3.6.8 Tensión de Contacto Metal con Metal**

Es la diferencia de potencial entre objetos metálicos o estructuras dentro de los lugares de la subestación que puede establecer un puente por el contacto directo mano-mano o mano-pie.

La tensión de contacto metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas al sistema de puesta a tierra se asume despreciable en subestaciones convencionales. Sin embargo, la tensión de contacto metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas al sistema de Puesta a Tierra y objetos metálicos internos de la subestación, tal como una cerca aislada, pero no conectada a la rejilla de tierra puede ser considerable. En el caso de las subestaciones aisladas con gas (GIS), la tensión de contacto metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas a la malla de puesta a tierra se debe a las faltas internas o a las corrientes inducidas en los encerramientos.

### **3.6.9 Electrodo de Tierra**

Conductor introducido en la tierra y se usa para recoger o disipar la corriente, desde o hacia el interior del planeta Tierra.

### **3.6.10 Malla de Tierra**

Es una placa sólida metálica o un sistema de conductores sin cubierta con espacios estrechos que se conectan y con frecuencia se colocan a pocas profundidades sobre una rejilla de tierra o en otros sitios de la superficie de la Tierra. Se trata de obtener una medida extra de protección minimizando el peligro de la exposición de altas tensiones de paso o de contacto en áreas o lugares de operaciones críticas que frecuentemente utilizan las personas.

### **3.6.11 Subestación**

Conjunto situado en un mismo lugar que los aparatos eléctricos y los edificios necesarios para realizar alguna de las funciones siguientes: transformación de la tensión, de la frecuencia, del número de fases, rectificación, compensación del factor de potencia y conexión de dos o más circuitos.

### **3.6.12 Zona de protección**

Es el espacio comprendido entre los límites de los lugares accesibles, por un lado, y los elementos que se encuentran bajo tensión, por otro.

## 4. Conceptos generales sobre una Puesta a Tierra

---

### 4.1 Procedimiento de instalaciones de Puesta a Tierra

Teniendo en cuenta las tensiones aplicadas máximas establecidas, al proyectar una instalación de Puesta a Tierra se seguirá el procedimiento siguiente según la normativa MIE-RAT 13:

- Investigación de las características del suelo, en particular la resistividad.
- Determinación de las corrientes máximas de puesta a tierra y del tiempo máximo correspondiente a la eliminación del defecto.
- Diseño preliminar de la instalación de tierra.
- Cálculo de la resistencia del sistema de tierra.
- Cálculo de las tensiones de paso y contacto en el interior de la instalación.
- Comprobar que dichas tensiones son inferiores a los valores máximos definidos anteriormente.
- Corrección y ajuste del diseño inicial estableciendo el definitivo.

Todos estos pasos se detallarán más adelante, paso a paso, para determinar en un caso real la instalación de Puesta a Tierra de una subestación.

#### 4.1.1 Elementos de las instalaciones y condiciones de montaje

Las instalaciones de Puesta a Tierra estarán constituidas por uno o varios electrodos enterrados y por las líneas de tierra que conecten dichos electrodos a los elementos que deban quedar puestos a tierra.

En las líneas de tierra deberán existir los suficientes puntos de Puesta a Tierra, que faciliten las medidas de comprobaciones del estado de los electrodos y la conexión a tierra de la instalación.

### **4.1.2 Líneas de tierra**

Los conductores empleados en las líneas de tierra tendrán una resistencia mecánica adecuada y ofrecerán una alta resistencia a la corrosión

Su sección será tal, que la máxima corriente que circule por ellos en caso de defecto o de descarga atmosférica no lleve a estos conductores a una temperatura cercana a la de fusión, ni ponga en peligro sus empalmes y conexiones.

### **4.1.3 Instalación de líneas de tierra**

Los conductores de la línea de tierra deben instalarse procurando que su recorrido sea lo más corto posible, evitando trazados tortuosos y curvas de poco radio. Se recomienda que sean conductores desnudos instalados al exterior de forma visible.

En el caso de que fuese conveniente realizar la instalación cubierta, deberá serlo de forma que pueda comprobarse el mantenimiento de sus características.

En las líneas de tierra no podrán insertarse fusibles ni interruptores.

### **4.1.4 Electrodo de Puesta a Tierra**

Estarán formados por materiales metálicos en forma de varillas, cables, chapas, perfiles que presenten una resistencia elevada a la corrosión por sí mismos o mediante una protección adicional.

Los electrodos podrán disponerse de las siguientes formas:

- a) Picas clavadas en el terreno, constituidas por tubos, barras u otros perfiles que podrán estar formados por elementos empalmables.
- b) Varillas, barras o cables enterrados, dispuestos en forma radial, mallada o anular.
- c) Placas o chapas enterradas.

En la elección del tipo de electrodos, así como de su forma de colocación y de su emplazamiento, se tendrán presentes las características generales de la instalación eléctrica del terreno, el riesgo potencial de las personas y los bienes.

Se procurará utilizar las capas de tierra más conductoras, haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a la compactación del terreno.

Se deberá tener en cuenta la influencia de las heladas para determinar la profundidad de la instalación.

## 4.2 Características del suelo y de los electrodos

Para realizar un proyecto de instalación de Puesta a Tierra es necesario estudiar las características del terreno. Sin embargo, muchas veces es muy complicado determinar un valor numérico para una característica concreta.

### 4.2.1 Resistividad del terreno

A continuación, se presentan una tabla que muestra los valores de resistividad de los terrenos de acuerdo a su naturaleza, los cuales son solo orientativos:

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD ( $\Omega\text{m}$ )
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Roca de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

Tabla 1. Resistividad del terreno según su naturaleza

### 4.2.2 Humedad

Cuando la humedad del terreno varíe considerablemente de unas épocas del año a otras, se tendrá en cuenta esta circunstancia al dimensionar y establecer el sistema de Puesta a Tierra. Se podrá usar recubrimientos de gravas como ayuda para conservar la humedad del suelo.

La humedad facilita la disociación de las sales en iones positivos y negativos: al haber humedad hay mayor conductividad y por lo tanto menor resistividad.

Muchas veces, una manera de reducir la resistencia de Puesta a Tierra es humedeciendo el terreno a lo largo del tiempo, logrando así valores bajos de resistividad. Hay algunas instalaciones que tiene prevista una tubería de agua, la que utilizan para mantener una concentración de humedad en todas las épocas y durante años, manteniendo valores bajos de resistividad.

### **4.2.3 Temperatura**

Al alcanzar el suelo temperaturas inferiores a 0°C, aumenta mucho su resistividad. Por ello, en zonas con peligro de heladas, los electrodos se enterrarán a una profundidad que no alcance esa temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia en el cálculo.

Para sitios con climas tropicales, no es necesario enterrar un electrodo a grandes profundidades, procedimiento muy común en países donde generalmente no les conviene instalar conductores enterrados horizontalmente a poca profundidad porque los primeros uno o dos metros de la superficie del suelo se congelan en el invierno, lo que produce un aumento de la resistividad.

### **4.2.4 Salinidad**

La cantidad de agua presente en el suelo es un factor determinante en la resistividad del suelo y la del agua está determinada por la cantidad de sales disueltas en ella. Pequeñas cantidades de sales disueltas pueden reducir considerablemente la resistividad del suelo.

## **4.3 Medida de la Resistividad**

Para conseguir un valor bajo de resistencia de Puesta a Tierra es necesario saber la resistividad del terreno y su espesor respectivo, para ello debe evaluarse el comportamiento del suelo como conductor eléctrico a partir de la toma de medidas.

Al margen de otras consideraciones, el instrumento de medida deberá ser de corriente alterna por las siguientes razones:

- La aplicación de c.c. en el agua con sales disueltas podría dar lugar a fenómenos electrolíticos que confundirían los resultados.
- En el suelo a veces están presentes corrientes parásitas, particularmente en las inmediaciones de instalaciones de potencia, éstas podrían falsear la medida.

Empleando corriente alterna en la medida de una frecuencia algo mayor a la industrial, puede sintonizarse la respuesta del equipo de modo que resulte improbable la influencia externa.

A la hora de la medición deben tenerse en cuenta las siguientes precauciones:

- Las mediciones deben efectuarse en épocas apropiadas en la sierra en estiaje y en la costa en verano.
- Los electrodos de exploración deben tener un buen contacto con el terreno.
- Si el terreno es deslizante remover el material suelto hasta encontrar tierra firme.
- Si el suelo tiene capa gruesa de arena verter agua en el punto de clavado de los electrodos.
- Verificar el punto de contacto de la bornera de los instrumentos y la toma de los electrodos.
- Verificar los conductores gastados para evitar puntos de degradación del aislamiento.
- Verificar la presencia de corrientes inducidas.
- La resistencia de los electrodos auxiliares y conductores deben ser tal que no influyan en las mediciones.

También hay que tener en cuenta ciertas condiciones desfavorables en las cuales no se debe realizar la medición de la resistividad:

- Después de la lluvia.
- Durante alta humedad ambiental.
- Cuando hay conductores sin aislamiento y no se logran buen contacto en el conexionado.
- Durante horas de tormenta.
- Durante horas de humedad.
- Durante la ejecución de trabajos de mantenimiento sobre la infraestructura en las proximidades.

Para un análisis real del terreno es fundamental efectuar la medición de la resistividad del terreno. Los métodos de medición se pueden clasificar dependiendo del número de electrodos utilizados:

- Método de dos electrodos.
- Método de cuatro electrodos.
- Configuración de Wenner.

#### **4.3.1 Método de los Dos Electrodos**

Con este método se realizan mediciones aproximadas sobre pequeños volúmenes de suelo homogéneos, utilizando para ellos dos pequeños electrodos de hierro. Uno de los electrodos es más corto que el otro, y se conectan a una batería a través de un

miliamperímetro. El terminal positivo de la batería se conecta a través del miliamperímetro al electrodo más pequeño y el terminal negativo al otro electrodo.

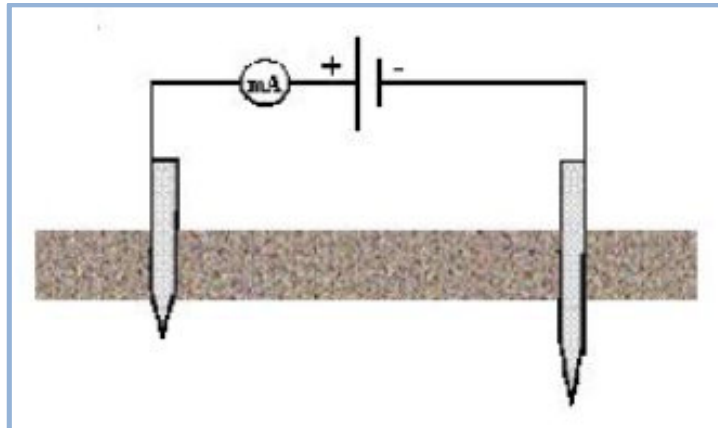


Ilustración 1. Cuaderno Técnico Schneider PT-009

La ventaja de este método es que la medición se realiza fácilmente, pero su aplicación está limitada a pequeños volúmenes de suelos, enterrando los electrodos en el terreno, en las paredes o en el fondo de las excavaciones.

### 4.3.2 Método de los Cuatro Electrodos

Consiste en inyectar corrientes a través de dos electrodos externos y medir la tensión o caída de potencial entre los dos electrodos interno. Todos los electrodos están alineados y enterrados a una misma profundidad “b”.

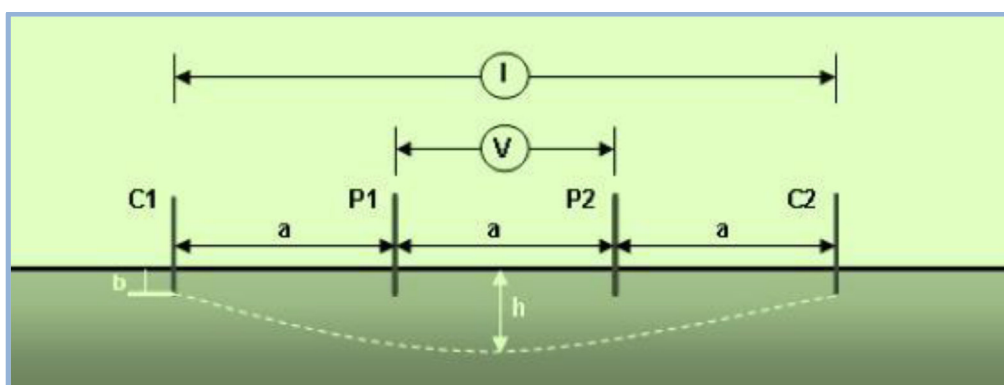


Ilustración 2. Cuaderno Técnico Schneider PT-009

Entre los electrodos C1 y C2 se inyecta una corriente  $I$ , y entre P1 y P2 se mide la diferencia de potencial. Si la profundidad  $b$  es muy pequeña, en comparación con la separación entre electrodos ( $a \gg b$ ), puede suponerse una distribución radial de corriente y electrodos puntuales y además se supone homogeneidad o uniformidad del terreno,



entonces la resistividad en términos de unidades de longitud es dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \frac{1}{\left(\frac{1}{C1P1} - \frac{1}{P1C2}\right) - \left(\frac{1}{C1P2} - \frac{1}{P2C2}\right)}$$

Donde

V: Diferencia de potencial entre dos electrodos

I: Corriente inyectada

C1P1: Distancia entre los electrodos C1 y P1

P1C2: Distancia entre los electrodos P1 y C2

C1P2: Distancia entre los electrodos C1 y P2

P2C2: Distancia entre los electrodos P2 y C2

En la práctica, para determinar la constitución del terreno investigado, es necesario tener diferentes separaciones entre electrodos, con el objeto de lograr lecturas a lo largo o a través de las diferentes composiciones del terreno investigado y poder conseguir así un promedio de la resistividad.

### 4.3.3 Método Wenner

Este es el método más utilizado. El método establece el paso de corriente entre dos electrodos alineados en el suelo, y mide la tensión presente, debida a esta corriente en otros dos electrodos. Los cuatro electrodos son equidistantes con separación “a” y en línea recta.

La disposición habitual es con los dos electrodos de corriente en los extremos, como se indica en la figura.

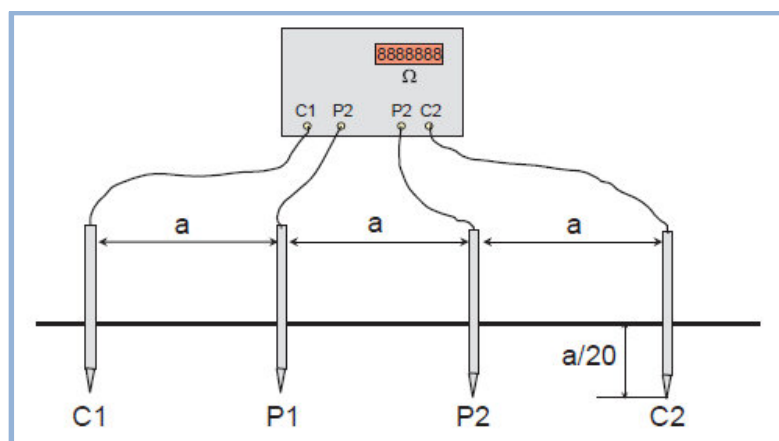


Ilustración 3. Cuaderno Técnico Schneider nº 158

La resistencia medida resultante (R) permite determinar la resistividad buscada por la fórmula:

$$\rho = 2\pi aR$$

Donde

$\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ )

a: Distancia entre electrodos (m)

R: Resistencia medida ( $\Omega$ )

Otras disposiciones de los electrodos permiten obtener la resistividad de acuerdo a la siguiente tabla:

CONFIGURACIÓN DE ELECTRODOS				FÓRMULA RESISTIVIDAD
C	P	P	C	$\rho = 2 \pi aR$
P	C	C	P	
C	C	P	P	$\rho = 6 \pi aR$
P	P	C	C	
C	P	C	P	$\rho = 3 \pi aR$
P	C	P	C	

Ilustración 4. Cuaderno Técnico Schneider PT-009

#### 4.3.4 Seguridad

Es prudente que el electrodo bajo prueba no esté en conexión con el sistema que protege, puede ser peligroso en caso de fallo.

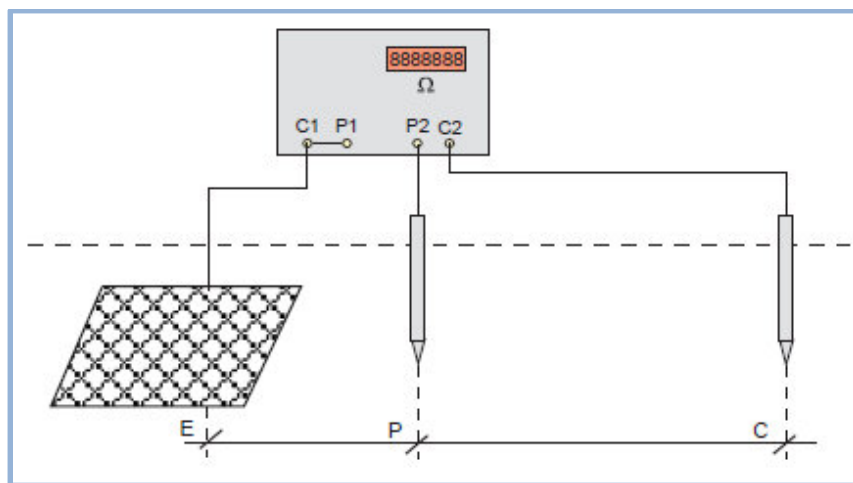


Ilustración 5. Cuaderno Técnico Schneider PT-009

## 4.4 Vigilancia de las instalaciones de Puesta a Tierra

El Director de Obra deberá verificar que las tensiones de paso y contacto aplicadas están dentro de los límites admitidos con un voltímetro de resistencia interna de mil ohmios. El término “aplicadas” está asociado a la existencia de la persona en la instalación, la cual no queda expuesta a la totalidad de la tensión de paso o contacto existente en la instalación bajo defecto sino a una fracción de la misma, al considerar las resistencias que intervienen en el circuito.

Los electrodos de medida para la simulación de los pies deberán tener una superficie de 200 cm<sup>2</sup> cada uno y deberán ejercer sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N cada uno. La fuerza de 250 Newton a que se alude puede obtenerse mediante pesos de:

$$\frac{250}{9,8} \text{ kg } (\cong 25 \text{ kg}).$$

Se elegirán fuentes de alimentación de la potencia adecuada para simular el defecto, de forma que la intensidad empleada en el ensayo sea como mínimo el 1% de la corriente para la cual ha sido dimensionada la instalación sin que sea inferior a 50 A para centrales y subestaciones y 5 A para los centros de transformación, con lo que se eliminan los defectos de las posibles tensiones vagabundas o parásitas. Los cálculos se harán suponiendo que existe proporcionalidad, para determinar las tensiones posibles máximas. Hay que sobreentender que el 1% se refiere a la corriente de puesta a tierra prevista en el diseño. No parece razonable que se refiera a la corriente de defecto máxima en la instalación puesto que está con valores muy elevados en el caso de fallos en BT internos en la instalación, no tiene nada que ver con la parte de la corriente que provoca la elevación de potencial en la red de tierras.

Las instalaciones de tierra serán revisadas al menos una vez cada tres años a fin de comprobar el estado de las mismas.

## 4.5 Efecto de la Corriente en el Cuerpo Humano

Una instalación de Puesta a Tierra sirve, principalmente, para proteger a las personas que se encuentran dentro de ella como en sus alrededores y para la protección de los equipos que se encuentran dentro de la misma.

La instalación incorrecta de un sistema de Puesta a Tierra implica desde lesiones menores hasta la muerte de una persona, o daños costosos o irreparables en los equipos y en las instalaciones. Los errores en el sistema de Puesta a Tierra representan un peligro de seguridad industrial.

A continuación analizaremos cómo afecta la corriente al cuerpo humano.

Para un mismo trayecto de corriente a través del cuerpo humano, el peligro en que incurren las personas, depende esencialmente de la intensidad y de la duración de paso de la corriente. Sin embargo, las zonas tiempo/corriente no son, en muchos casos, directamente aplicables en la práctica para concebir la protección contra los choques eléctricos.

Las diferentes partes del cuerpo humano –tales como la piel, la sangre, los músculos, y las articulaciones– presentan para la corriente eléctrica una cierta impedancia compuesta de elementos resistivos y capacitivos. Sin embargo, la impedancia interna del cuerpo puede considerarse esencialmente como resistiva, con la particularidad de ser la resistencia de los brazos y las piernas mucho mayor que la del tronco.

Los principales fenómenos fisiológicos que tienen lugar en el cuerpo humano al pasar la corriente sobre este, se describen a continuación.

Una persona se electriza cuando la corriente eléctrica circula por su cuerpo, es decir, cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo, al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. La electrocución se produce cuando dicha persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo.

La fibrilación ventricular consiste en el movimiento anárquico del corazón, el cual, deja de enviar sangre a los distintos órganos y, aunque esté en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento.

La tetanización se define como el movimiento incontrolado de los músculos como consecuencia del paso de la energía eléctrica. Dependiendo del recorrido de la corriente perderemos el control de las manos, brazos, músculos pectorales, etc.

La asfixia se produce cuando el paso de la corriente afecta al centro nervioso que regula la función respiratoria, ocasionando el paro respiratorio.

Otros factores fisiopatológicos tales como contracciones musculares, aumento de la presión sanguínea, dificultades de respiración, parada temporal del corazón, etc. pueden producirse sin fibrilación ventricular. Tales efectos no son mortales, son, normalmente, reversibles y, a menudo, producen marcas por el paso de la corriente. Las quemaduras profundas pueden llegar a ser mortales.

Las alteraciones de la piel humana dependen de la densidad de corriente  $i_s$  (mA/mm<sup>2</sup>) y de la duración del paso de la corriente. Se pueden dar los siguientes valores:

- Zona 0: en general no se observa alteración de la piel, salvo que el tiempo de exposición sea de varios segundos, en cuyo caso, la piel en contacto con el electrodo puede tomar un color grisáceo con superficie rugosa.
- Zona 1: aparece enrojecimiento de la piel con una hinchazón en forma de onda de color blanquecino a lo largo de los bordes donde estaba situado el electrodo.
- Zona 2: se produce un color pardo bajo el electrodo situado en la piel que estaba situada bajo el electrodo. Si la duración es de varias decenas de segundos se produce una clara hinchazón (ampollas) alrededor del electrodo.
- Zona 3: se puede producir una carbonización de la piel.

Para zonas de contacto importantes, las densidades de corriente pueden ser suficientemente débiles, de manera que no se produzca ninguna alteración de la piel aunque las intensidades sean mortales.

La siguiente gráfica indica la dependencia de las alteraciones de la piel humana en función de la densidad de corriente y de la duración del paso de la corriente.

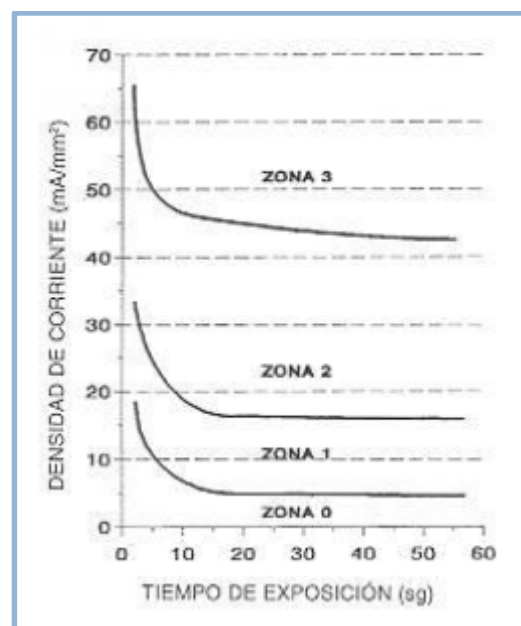


Ilustración 6. UNE 20-572-92- 1

Los efectos que produce una corriente alterna de frecuencia comprendida entre 15 y 100 Hz con un recorrido mano izquierda-los dos pies se pueden diferenciar en 4 zonas:

- Zona 1: habitualmente ninguna reacción.
- Zona 2: generalmente ningún efecto fisiológico peligroso.
- Zona 3: habitualmente ningún daño orgánico. Con duración superior a 2 segundos se pueden producir contracciones musculares dificultando la

respiración, paradas temporales del corazón sin llegar a la fibrilación ventricular, etc.

- Zona 4: riesgo de parada cardiaca por: fibrilación ventricular, parada respiratoria, quemaduras graves, etc.

### **4.5.1 Principales factores que influyen en el efecto eléctrico**

Los principales factores que influyen en el efecto eléctrico son: intensidad de corriente, la duración del contacto eléctrico y la impedancia del cuerpo humano.

#### **4.5.1.1 Intensidad de la corriente**

Es uno de los factores que más inciden en los efectos ocasionados por el accidente eléctrico. Se describen los efectos de la corriente eléctrica alterna de frecuencias comprendidas entre 15 y 100 Hz al pasar por el cuerpo humano:

- Umbral de percepción: es el valor mínimo de la corriente que provoca una sensación en una persona, a través de la que pasa esta corriente. En corriente alterna esta sensación de paso de la corriente se percibe durante todo el tiempo de paso de la misma; sin embargo, con corriente continua sólo se percibe cuando varía la intensidad, por ello son fundamentales el inicio y la interrupción del paso de la corriente, ya que entre dichos instantes no se percibe el paso de la corriente, salvo por los efectos térmicos de la misma. Generalizando, se considera un valor de 0,5 mA en corriente alterna y 2 mA en corriente continua, cualquiera que sea el tiempo de exposición.
- Umbral de reacción: es el valor mínimo de la corriente que provoca una contracción muscular.
- Umbral de no soltar: cuando una persona tiene sujetos unos electrodos, es el valor máximo de la corriente que permite a esa persona soltarlos. En corriente alterna se considera un valor máximo de 10 mA, cualquiera que sea el tiempo de exposición. En corriente continua, es difícil establecer el umbral de no soltar ya que sólo el comienzo y la interrupción del paso de la corriente provocan el dolor y las contracciones musculares.
- Umbral de fibrilación ventricular: es el valor mínimo de la corriente que puede provocar la fibrilación ventricular. En corriente alterna, el umbral de fibrilación ventricular decrece considerablemente si la duración del paso de la corriente se prolonga más allá de un ciclo cardíaco. Adecuando los resultados de las experiencias efectuadas sobre animales a los seres humanos, se han establecido

unas curvas, por debajo de las cuales no es susceptible de producirse. La fibrilación ventricular está considerada como la causa principal de muerte por choque eléctrico. En corriente continua, si el polo negativo está en los pies (corriente descendente), el umbral de fibrilación es de aproximadamente el doble de lo que sería si el polo positivo estuviese en los pies (corriente ascendente). Si en lugar de las corrientes longitudinales antes descritas fuese una corriente transversal, la experiencia sobre animales hace suponer que, solo se producirá la fibrilación ventricular con intensidades considerablemente más elevadas.

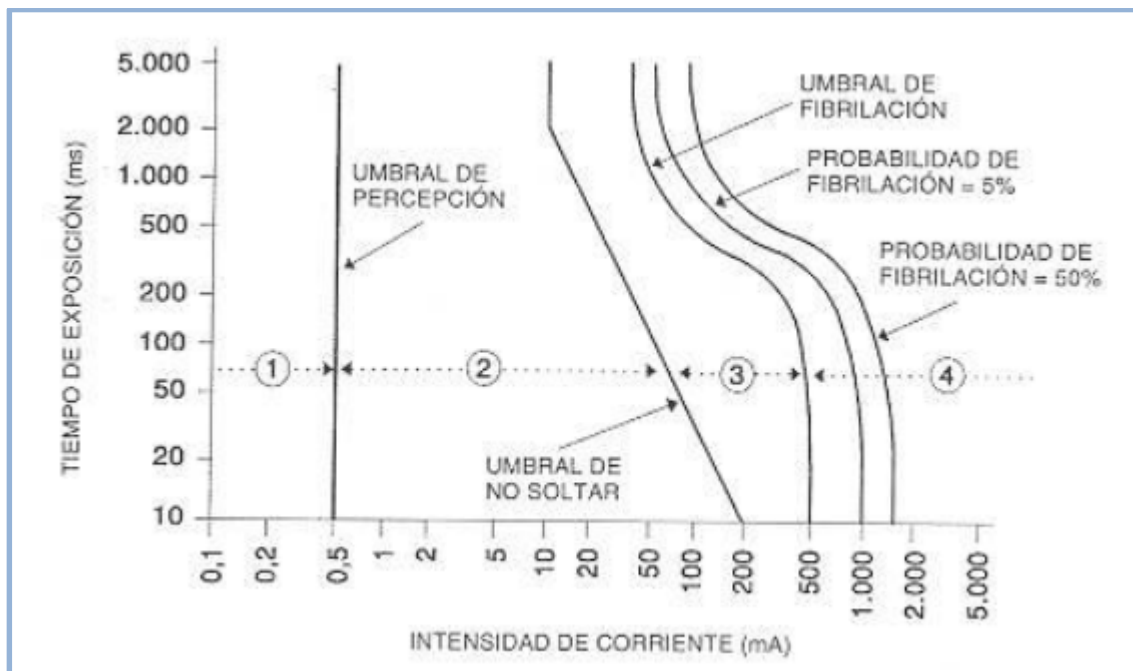


Ilustración 7. UNE 20-572-92- 1

#### 4.5.1.2 Duración del contacto eléctrico

Junto con la intensidad es el factor que más influye en el resultado del accidente. Por ejemplo, en corriente alterna y con intensidades inferiores a 100 mA, la fibrilación puede producirse si el tiempo de exposición es superior a 500 ms.

#### 4.5.1.3 Impedancia del cuerpo humano

Durante el paso de la electricidad, la impedancia de nuestro cuerpo se comporta como una suma de tres impedancias en serie:

- Impedancia de la piel en la zona de entrada.
- Impedancia interna del cuerpo.
- Impedancia de la piel en la zona de salida.

## 4.6 Índice de parámetros

A continuación se adjunta una tabla con los parámetros que se va a utilizar durante el desarrollo del proyecto, así como los símbolos a los que se corresponden.

Índice de parámetros	Símbolo
Resistividad del Terreno	$\rho$
Resistividad Superficial	$\rho_s$
Resistividad Aparente	$\rho_a$
Factor de Reflexión entre Diferentes Resistividades	K
Impedancia de Secuencia Directa	$Z_1$
Impedancia de Secuencia Inversa	$Z_2$
Impedancia de Secuencia Homopolar	$Z_0$
Factor de Tensión	c
Corriente de Falta Monofásica	$I_{F1}$
Corriente de Falta Bifásica	$I_{F2}$
Falta de Corriente Simétrica	$3I_0$
Máxima Corriente que entra en la Malla	$I_G$
Corriente Simétrica de Malla	$I_g$
Conductividad del Material	$\sigma$
Factor de Decremento	$D_f$
Constante de Tiempo del DC Offset	$T_a$
Longitud del Lado de la Malla	L
Área Total Rodeada por el Mallado	A
Diámetro del Conductor	d
Distancia entre Conductores	D
Distancia Máxima entre dos Puntos Cualesquiera de la Malla	$D_m$
Perímetro	$L_p$
Longitud Total de la Malla	$L_c$
Longitud Total de Picas	$L_R$
Longitud Efectiva para Tensión de Malla	$L_M$
Longitud de la Pica	$L_r$
Longitud Total Efectiva de los Conductores de PAT, Incluyendo Picas y Mallado	$L_T$
Máxima Longitud de Malla en la Dirección X	$L_X$
Máximo Longitud de Malla en la Dirección Y	$L_Y$
Factor geométrico	$n_a$
Factor geométrico	$n_b$
Factor geométrico	$n_c$
Factor geométrico	$n_d$
Factor Geométrico Compuesto por los Factores $n_a$ , $n_b$ , $n_c$ y $n_d$	n
Factor de Corrección para el Efecto Profundidad de Malla	$K_h$
Número de Picas en el Área A	$n_R$



Diámetro de Picas	2b
Profundidad de la Capa Superficial Protectora	h <sub>s</sub>
Factor Decremento de La Capa Superficial Protectora	C <sub>s</sub>
Duración de la Descarga que Determina la Corriente Permitida por un Cuerpo	t <sub>s</sub>
Tensión de Contacto Metal-Metal	E <sub>mm</sub>
Tensión de Paso Admisible para una Persona de 50 kg	E <sub>step50</sub>
Tensión de Paso Admisible para una Persona de 70 kg	E <sub>step70</sub>
Tensión de Contacto Admisible para una Persona de 50 kg	E <sub>touch50</sub>
Tensión de Contacto Admisible para una Persona de 70 kg	E <sub>touch70</sub>
Profundidad de Enterramiento de los Conductores	h <sub>s</sub>
Resistencia de PAT	R <sub>g</sub>
Radio Efectivo del Conductor	a'
Coeficiente k1	k1
Coeficiente k2	k2
Resistencia de PAT del Conductor	R <sub>1</sub>
Resistencia de PAT Picas	R <sub>2</sub>
Resistencia de PAT Mutua	R <sub>m</sub>
Permeabilidad Relativa	μ <sub>r</sub>
Resistencia del Conductor	R'
Permeabilidad del Aire	μ <sub>0</sub>
Profundidad del Conductor Equivalente	δ
Impedancia Propia del Conductor	Z <sub>n</sub> '
Impedancia Mutua del Conductor	Z <sub>m</sub> '
Factor de Reducción	r
Resistencia Apoyos de la Línea	R <sub>M</sub>
Resistencia PAT Apoyo	R <sub>PAT</sub>
Longitud de la Línea	L <sub>línea</sub>
Corriente de Malla	I <sub>A</sub>
Split Factor	S <sub>f</sub>
Factor Geométrico Tensión de Contacto	K <sub>m</sub>
Factor Geométrico Tensión de Paso	K <sub>s</sub>
Tensión Máxima de Contacto en la Malla	E <sub>m</sub>
Tensión Máxima de Paso en la Malla	E <sub>s</sub>

Tabla 2. Índice de parámetros

## 5. Procedimiento de Diseño de la Hoja de Cálculo

El procedimiento que se ha seguido para la creación de la Hoja de Cálculo es, principalmente, el seguido por la Norma IEEE Std 80-2000 “*Guide for Safety in AC Substation Grounding*”. En los siguientes apartados se expondrán los métodos en los que se basa esta Hoja de Cálculo y las fórmulas utilizadas en ella para que el lector pueda comprender de dónde salen los resultados finales que se obtienen.

Los pasos para obtener el diseño de Puesta a Tierra se pueden resumir en el siguiente diagrama de bloques:

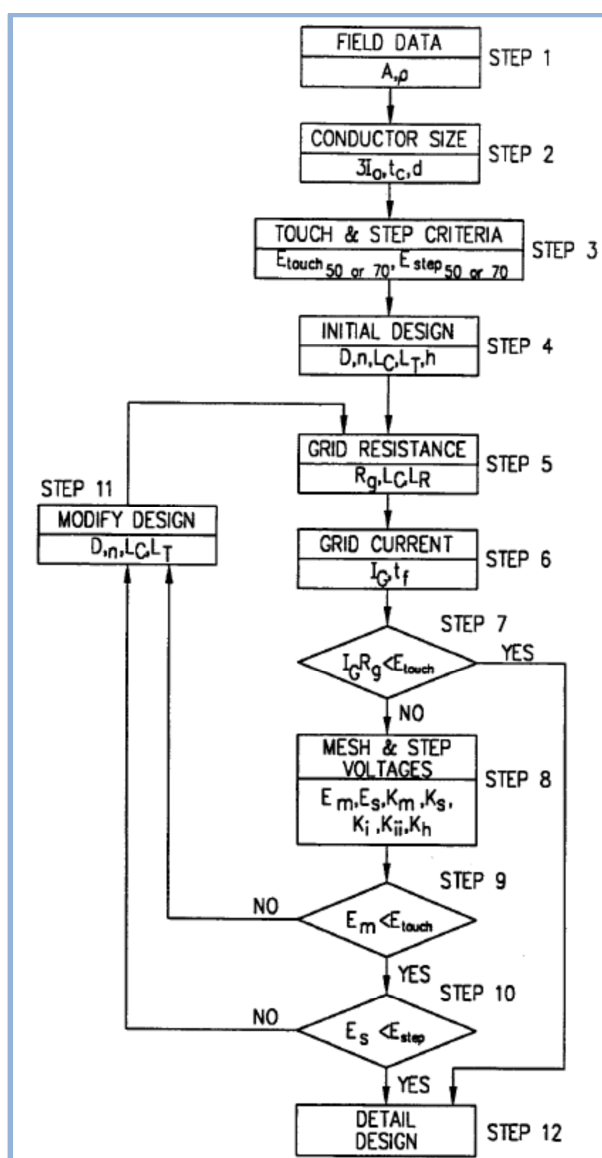


Ilustración 8. IEEE 80-2000

Los seis primeros pasos sirven para calcular los parámetros de la Puesta a Tierra y la configuración de la malla.

En el paso siete, si el GPR del diseño preliminar es menor que la tensión de contacto admisible, no harían falta más cálculos. En caso contrario, habrá que modificar la red de puesta a tierra. Igualmente ocurre en los pasos nueve y diez con la tensión de malla y las tensiones de contacto y de paso respectivamente.

## 5.1 Primer Paso: Cálculo de la Resistividad del Terreno

El mapa y la localización del terreno deben dar una buena estimación sobre la superficie donde se va a establecer la PAT. Un estudio de la resistividad del suelo determinará el perfil de resistividades de éste y el tipo de modelo necesario (esto es, resistividad uniforme o modelo bicapa).

### 5.1.1 Modelo de Resistividad Uniforme

El modelo de Resistividad Uniforme puede ser usado en vez del modelo Bicapa siempre que las herramientas de cálculo para éste último no estén disponibles. Pero cuando el contraste entre varias capas es moderado, se debe usar la media de la resistividad del terreno como una primera aproximación o para establecer un orden de magnitudes.

Así, la resistividad aparente del terreno se tomará como la media aritmética del conjunto de las resistividades obtenidas experimentalmente a diferentes profundidades. De tal manera que la resistividad aparente tiene la siguiente expresión:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \dots + \rho_a(n)}{n}$$

Donde

$\rho_{a(1)}, \rho_{a(2)}, \dots, \rho_{a(n)}$ : Resistividades obtenidas experimentalmente en el suelo a distintas profundidades ( $\Omega \cdot m$ )

O

$$\rho_{2(av2)} = \frac{\rho_{amax} + \rho_{amin}}{2}$$

Donde

$\rho_{a(\max)}$ : máximo valor de la resistividad aparente (obtenido experimentalmente) ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_{a(\min)}$ : Mínimo valor de la resistividad aparente (obtenido experimentalmente) ( $\Omega \cdot m$ )

### 5.1.2 Modelo Bicapa

El modelo de dos capas se puede representar por una capa superior de profundidad finita sobre una capa inferior de profundidad infinita. El cambio brusco entre las resistividades de las dos capas se puede definir con un factor de reflexión (K) definido por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

Donde

$\rho_1$ : Resistividad del terreno en la capa superior ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_2$ : Resistividad del terreno en la capa inferior ( $\Omega \cdot m$ )

El método de las dos capas también se puede aproximar mediante métodos gráficos utilizando el gráfico de Sundae.

#### 5.1.2.1 Método de Sundae

- Obtención gráfico resistividad aparente frente a la distancia de los electrodos (Método de Wenner).
- Aproximación de los puntos a un polinomio de tercer grado.
- El valor de la resistividad aparente tiene lugar en el punto de inflexión de la curva.
- El valor de la resistividad del terreno en la capa superior se obtiene de calcular la media aritmética entre valores cuya distancia entre electrodos son las más pequeñas.
- El valor de la resistividad del terreno en la capa inferior se obtiene de calcular la media aritmética entre los valores cuya distancia entre electrodos son las más altas.
- Con las relaciones  $\rho_2/\rho_1$  y  $\rho_a/\rho_1$  se entra en el gráfico de Sundae y a partir de él, se puede obtener el valor de la profundidad (h) de la primera capa del terreno.

El gráfico de Sundae se muestra a continuación:

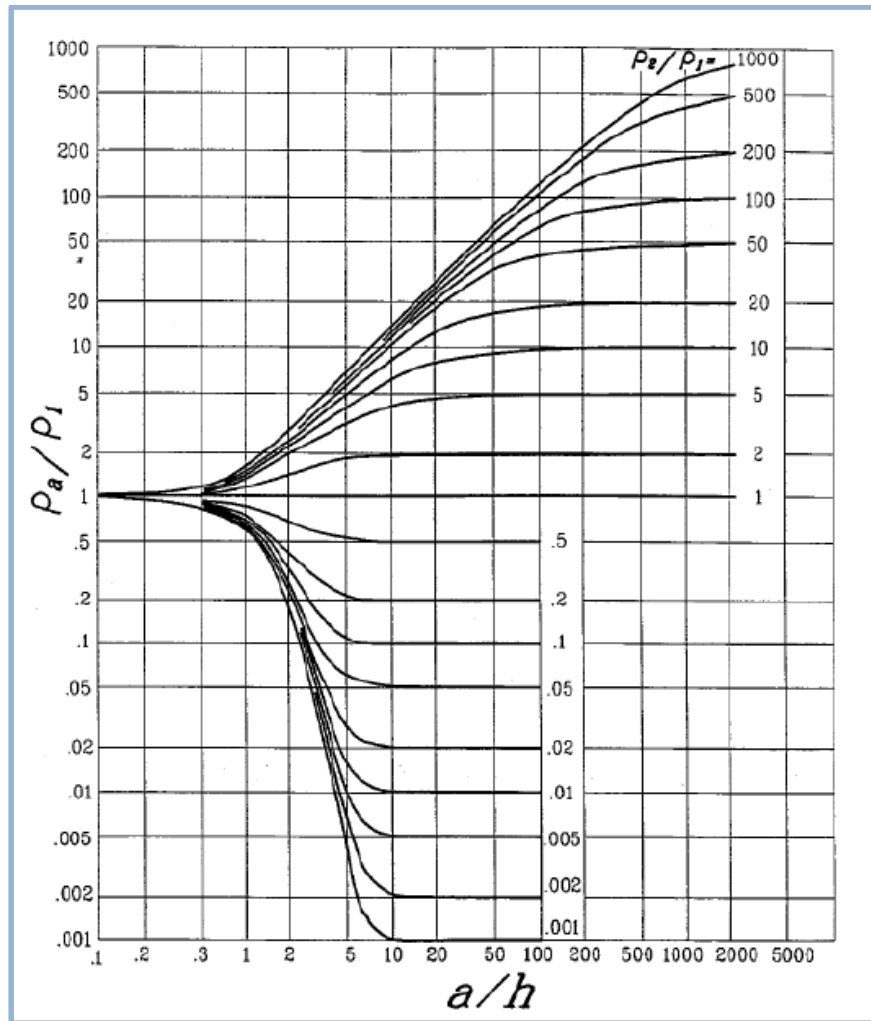


Ilustración 9. IEEE 80-2000

Es necesario señalar que el estudio de un suelo con el modelo de dos capas es mucho más exacto que uno con suelo de resistividad uniforme.

## 5.2 Segundo Paso: Cálculo de la Sección del Conductor

La fórmula necesaria para calcular la sección del Conductor que se va a utilizar para realizar posteriormente el mallado es la que se muestra a continuación:

$$A_{mm2} = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Donde

$A_{mm}^2$ : Sección del conductor ( $\text{mm}^2$ )

I: Corriente (kA)

$T_m$ : Temperatura máxima permitida ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$ : Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_r$ : Temperatura de referencia para las constantes de los materiales. (Se tomarán  $20^{\circ}\text{C}$ )

$\rho_0$ : Coeficiente térmico de resistividad a  $0^{\circ}\text{C}$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\alpha_r$ : Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia  $T_r$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\rho_r$ : Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia  $T_r$  ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )

$K_0$ :  $1/\alpha_0$  ó  $(1/\alpha_r) - T_r$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_c$ : Tiempo de duración de la corriente (s)

TCAP: Capacidad térmica del conductor por unidad de volumen [ $\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ ]

Los valores de  $\alpha_r$  y  $\rho_r$  se encuentran en la siguiente tabla con una misma temperatura referencia  $T_r$  ( $20^{\circ}\text{C}$ ).

Descripción	Conductividad del Material (%)	Coeficiente de resistividad térmico $\alpha_r$ a $20^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$K_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura de fusión $T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Resistividad $\rho_r$ a $20^{\circ}\text{C}$ ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	Capacidad térmica TCAP [ $\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ ]
100 Copper, annealed soft-drawn	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42
101 Copper, commercial hard-drawn	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42
102 Copper-clad steel wire	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85
103 Copper-clad steel rod	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85
104 Aluminum, EC grade	61	0,00403	228	657	2,86	2,56
105 Aluminum, 5005 alloy	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,6
106 Aluminum, 6201 alloy	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,6

107 Aluminum-clad steel wire	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,58
108 Steel, 1020	10,8	0,0016	605	1510	15,9	3,28
109 Stainless-clad steel rod	9,8	0,0016	605	1400	17,5	4,44
110 Zinc-coated steel rod	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,93
111 Stainless steel, 304	2,4	0,0013	749	1400	72	4,03

**Tabla 3 . IEEE 80-2000**

La capacidad térmica TCAP también puede ser calculada para materiales que no estén citados en la tabla con su correspondiente calor específico (SH) y peso específico (SW) de la siguiente manera:

$$TCAP[J/(cm^3 \cdot ^\circ C)] = 4.184(J/cal) \cdot SH[(cal/(gram \cdot ^\circ C))] \cdot SW(gram/cm)$$

Si quisiéramos obtener la sección del conductor en kcmil, en lugar de la fórmula dada anteriormente, habría que utilizar la siguiente:

$$A_{kcmil} = I \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

### 5.2.1 Corrientes asimétricas

En los casos que queramos tener en cuenta un posible componente de DC Offset en la corriente de falta, tenemos que determinar un valor equivalente para la corriente simétrica  $I_f$  usando el factor de reducción  $D_f$ .

En los casos en los que el tiempo de falta sea menor a 1 segundo o si la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema (X/R) es mayor que 5 habrá que tener en cuenta el factor de reducción. Así, la corriente que determina el valor de la sección será:

$$I_F = I_f \cdot D_f$$

Donde el factor de reducción  $D_f$  es:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)}$$

Y  $T_a$  es la constante de tiempo del DC Offset (s):

$$T_a = \frac{X}{\omega R}$$

Donde

$I_f$ : Corriente de falta simétrica (kA)

$D_f$ : Factor de reducción

$I_f$ : Corriente de falta asimétrica (kA)

$t_f$ : Tiempo de duración de la falta (s)

$T_a$ : Constante de tiempo del DC Offset (s)

$X/R$ : Relación entre la reactancia y resistencia del sistema

$f$ : Frecuencia de red

## 5.3 Tercer Paso: Diseño Inicial

En el diseño preliminar, se estimará la PAT con tres figuras básicas: cuadrada, rectangular y en forma de L.

Las constantes geométricas necesarias para el cálculo del diseño inicial son las que se muestran a continuación:

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x L_y}{A} \right]^{\left( \frac{0.7A}{L_x L_y} \right)}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{(L_x^2 + L_y^2)}}$$



$$n = n_a n_b n_c n_d$$

Dichas constantes geométricas son necesarias para el cálculo del factor de corrección ( $K_i$ ):

$$K_i = 0.664 + 0.148n$$

Así podremos calcular la longitud total efectiva para la tensión de malla ( $L_M$ )

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{(L_x^2 + L_y^2)}} \right) \right] L_R$$

Donde

A: Área total que encierra la PAT ( $m^2$ )

$L_c$ : Longitud total de los conductores horizontales (m)

$L_p$ : Longitud perimetral del recinto que engloba PAT (m)

$L_x$ : Longitud máxima del conductor en la dirección x (m)

$L_y$ : Longitud máxima del conductor en la dirección y (m)

$L_c$ : Longitud total de los conductores (m)

$D_m$ : Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera (m)

$L_r$ : Longitud de cada pica (m)

$L_R$ : Longitud total de picas (m)

$L_M$ : Longitud total efectiva (m)

Para usar la Hoja de Cálculo, además, será necesario introducir el número de conductores tanto en el eje X como en el eje Y, el número de picas y la longitud de cada pica. Éste último parámetro se puede obtener del catálogo.

## 5.4 Cuarto Paso: Cálculo de la Tensión de Paso y de Contacto

Para el cálculo de las tensiones de paso y de contacto, la Hoja de Cálculo permite la opción de elegir la normativa que se quiera utilizar ya que las fórmulas aplicadas en uno y en otro son diferentes. Al final de este apartado en la herramienta de cálculo, el usuario elegirá el método que prefiera.

Por un lado, se analizará el método que muestra la IEEE 80-2000, que a su vez enseña dos formas diferentes de calcular estas tensiones. Estos son: el método por la curva de

Dalziel's o la curva de Biegelmeier's. La Hoja de Cálculo obtiene el valor por ambos métodos y muestra como resultado el más desfavorable.

Por otro lado, se analizará el método que describe la instrucción técnica complementaria MIE-RAT 13.

### 5.4.1 Método IEEE 80-2000

Las tensiones de paso y de contacto no deben de exceder de un límite, a partir del cual la seguridad de una persona se pueda poner en peligro. Estos límites de tensión vienen dados por las siguientes ecuaciones, en los que se distingue entre una persona de 50 kg y por otra de 70 kg.

- **Tensión de paso:**

$$E_{step} = (R_B + 2R_f)I_B$$

-Para un cuerpo de 50Kg:

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

-Para un cuerpo de 70Kg:

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

- **Tensión de contacto:**

$$E_{touch} = \left(R_B + \frac{R_f}{2}\right)I_B$$

-Para un cuerpo de 50Kg:

$$E_{step50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

-Para un cuerpo de 70Kg:

$$E_{step70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Donde

$E_{step}$ : Tensión de paso (V)

$E_{touch}$ : Tensión de contacto (V)

$C_s$ : Factor reductor de la capacidad normal  
 $\rho_s$ : Resistividad del material superficial ( $\Omega \cdot m$ )  
 $t_s$ : Tiempo de descarga de la corriente (s)  
 $h_s$ : Profundidad de la capa superficial (m)

Si no se ha colocado ninguna capa superficial protectora entonces:  $C_s=1$  y  $\rho_s=\rho$ .

En el caso de la tensión de contacto metal-metal  $\rho_s=0$ , por lo que sustituyendo en las ecuaciones anteriores, la tensión de contacto metal-metal es:

-Para un cuerpo de 50Kg:

$$E_{mm-touch50} = \frac{116}{\sqrt{t_s}}$$

-Para un cuerpo de 70Kg:

$$E_{mm-touch70} = \frac{157}{\sqrt{t_s}}$$

Donde

$E_{mm}$ : Tensión de contacto metal-metal (V)

#### 5.4.1.1 Ecuaciones de Dalziel's y la Curva de Biegelmeier's

El máximo valor de corriente que es capaz de soportar una persona se ha estimado a partir de los resultados de diferentes estudios como las ecuaciones de Dalziel's o la curva de Biegelmeier's.

Las ecuaciones de Dalziel's establecen que el 99,5% de las personas resisten con seguridad, sin fibrilación ventricular, al paso de una corriente y un tiempo de descarga determinado por las siguientes expresiones:

-Para un cuerpo de 50Kg:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

-Para un cuerpo de 70Kg:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Por otra parte, la curva de Biegelmeier's (o curva de la Z) establece dos límites en función de la duración de la descarga. Es decir, si la duración del golpe eléctrico es menor que el tiempo de palpitación, el umbral de corriente es de 500 mA y si el golpe eléctrico es mayor que el tiempo de palpitación, el umbral de corriente es de 50 mA, para un adulto de peso de 50 kg.

Si se hace una comparativa de las ecuaciones de Dalziel's y la curva de la Z de la corriente corporal frente al tiempo de despeje, se obtiene la siguiente figura:

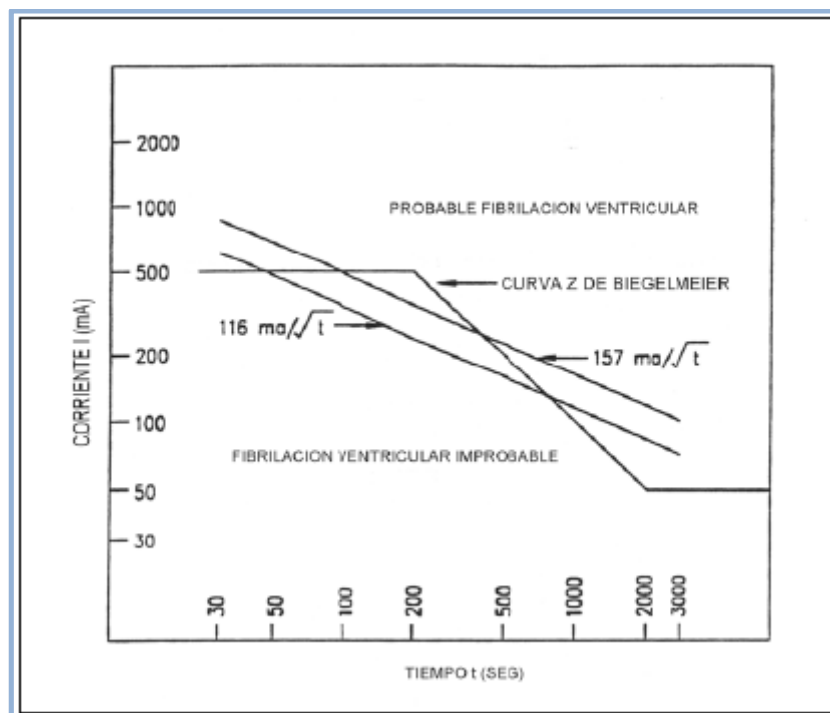


Ilustración 10. UNE 20-572-92- 1

Se observa que dependiendo en el punto que se considere, puede ser más restrictiva la curva de la Z o las dos rectas paralelas de Dalziel's. La Hoja de Cálculo obtendrá el valor más restrictivo de las dos curvas.

#### 5.4.2 MIE-RAT 13

Las tensiones obtenidas según MIE-RAT 13 son distintas a los otros dos métodos obtenidos según la IEEE 80-2000 comentados anteriormente, por lo que se tendrá en cuenta si se prefiere establecer los límites según este Reglamento.

La tensión máxima de contacto aplicada, en voltios, que se puede aceptar se determina en función del tiempo de duración del defecto, según la fórmula siguiente:

$$V_{ca} = \frac{K}{t^n}$$

Donde

$$\left\{ \begin{array}{l} K=72 \text{ y } n=1, \text{ para tiempos inferiores a } 0,9 \text{ segundos} \\ K=18.5 \text{ y } n=0,18, \text{ para tiempos superiores a } 0,9 \text{ segundos e inferiores a } 3 \text{ segundos} \end{array} \right.$$

t: duración de la falta en segundos

Para tiempos comprendidos entre 3 y 5 segundos, la tensión de contacto aplicada no sobrepasará los 64 V. En el caso de que el tiempo de falta sea mayor a 5 segundos, entonces, no se podrá superar una tensión máxima de contacto de 50 V.

Salvo casos excepcionales justificados no se considerarán tiempos inferiores a 0,1 segundos.

A partir de la fórmula anterior, se pueden determinar las máximas tensiones de paso y contacto admisibles en una instalación, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito.

A efectos del cálculo de proyecto se podrán emplear, para la estimación de las mismas, las expresiones siguientes:

- **Tensión de contacto:**

$$E_{touch} = \frac{k}{t^n} \left( 1 + \frac{1.5\rho_s}{1000} \right)$$

- **Tensión de paso:**

$$E_{step} = \frac{10k}{t^n} \left( 1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right)$$

Estas expresiones responden a un planteamiento simplificado del circuito, al despreciar la resistencia de la piel y del calzado, y se han determinado suponiendo que la resistencia del cuerpo humano es de 1000  $\Omega$ , y asimilando cada pie a un electrodo en forma de placa de 200 cm<sup>2</sup> de superficie, ejerciendo sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N, lo que representa una resistencia de contacto con el suelo evaluada en función de la resistividad superficial  $\rho_s$  del terreno de  $\rho$ .

## 5.5 Quinto Paso: Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra

Se considerarán dos casos: uno en el que el sistema de Puesta a Tierra está formado por conductores (sin picas) y un segundo caso en el que se combinen conductores y picas.

### 5.5.1 Mallado Conductores (sin picas)

La resistencia de Puesta a Tierra para este caso se define como:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Donde

$L_T$ : Longitud efectiva de todos los conductores (m)

$h$ : Profundidad a la que están enterrados los conductores (m)

$A$ : Área total del mallado ( $m^2$ )

$\rho$ : Resistividad uniforme del terreno ( $\Omega \cdot m$ )

### 5.5.2 Combinación de Conductores y Picas

La resistencia de Puesta a Tierra se ha calculado según las ecuaciones de Schwarz que tiene en cuenta la resistencia propia de los conductores enterrados, la resistencia de las picas y la mutua entre los conductores y las picas. Las expresiones para el cálculo son las siguientes:

#### 5.5.2.1 Resistencia de Puesta A Tierra de los conductores enterrados

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln\left(\frac{2L_c}{a'}\right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right]$$

$$\begin{cases} a' = \sqrt{a \cdot 2h} & \text{si } h \text{ es distinto de } 0 \\ a' = a & \text{si } h \text{ es igual a } 0 \end{cases}$$

Donde

$\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ )

$L_c$ : Longitud total de todos los conductores que forman la red de tierras (m)

$a'$ : Longitud efectiva (m)

$h$ : Profundidad a la que están enterrados los conductores (m)

$2a$ : Diámetro del conductor (m)

$A$ : Área total del mallado ( $m^2$ )

$k_1, k_2$ : Coeficientes de Schwarz

### 5.5.2.2 Resistencia de Puesta a Tierra de las picas

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right]$$

Donde

$n_R$ : Número de picas

$L_r$ : Longitud de cada pica (m)

$2b$ : Diámetro de cada pica (m)

$\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ )

### 5.5.2.3 Resistencia Mutua entre los conductores y las picas

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right]$$

### 5.5.2.4 Resistencia de puesta a tierra de todo el sistema

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

Donde

$R_1$  Resistencia de puesta a tierra de los conductores ( $\Omega$ )

$R_2$  Resistencia de puesta a tierra de las picas ( $\Omega$ )

$R_m$  Resistencia de puesta a tierra mutua entre conductores y picas ( $\Omega$ )

### 5.5.2.5 Coeficientes $k_1$ y $k_2$

Los valores de los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$ , se pueden calcular de dos maneras: a través de las curvas de Schwarz que aparecen en la norma IEEE 80-2000 o a través de las fórmulas de Kerckel, las cuales derivan de las curvas de Schwarz.

### 5.5.2.6 Curvas de Schwartz

Hay tres tipos de curvas: curva A, curva B o curva C. La curva A es válida cuando el conductor de la malla esté en la superficie, la curva B para profundidades que se aproximen a un valor de profundidad  $h$  igual a la décima parte de la raíz del área que ocupa la malla y la curva C se utilizará cuando el valor de  $h$  se aproxime a la sexta parte de la raíz del área de la malla.

	Curva A	Curva B	Curva C
$k_1$	$k_1 = -0,04L_x/L_y + 1,41$	$k_1 = -0,05L_x/L_y + 1,2$	$k_1 = -0,05L_x/L_y + 1,13$
$k_2$	$k_2 = 0,15L_x/L_y + 5,5$	$k_2 = 0,1L_x/L_y + 4,68$	$k_2 = 0,05L_x/L_y + 4,4$

Tabla 4. Coeficientes de Schwartz

Donde

$k_1, k_2$ : Coeficientes de Schwarz

$L_x$ : Longitud de la malla en el eje x (m)

$L_y$ : Longitud de la malla en el eje y (m)

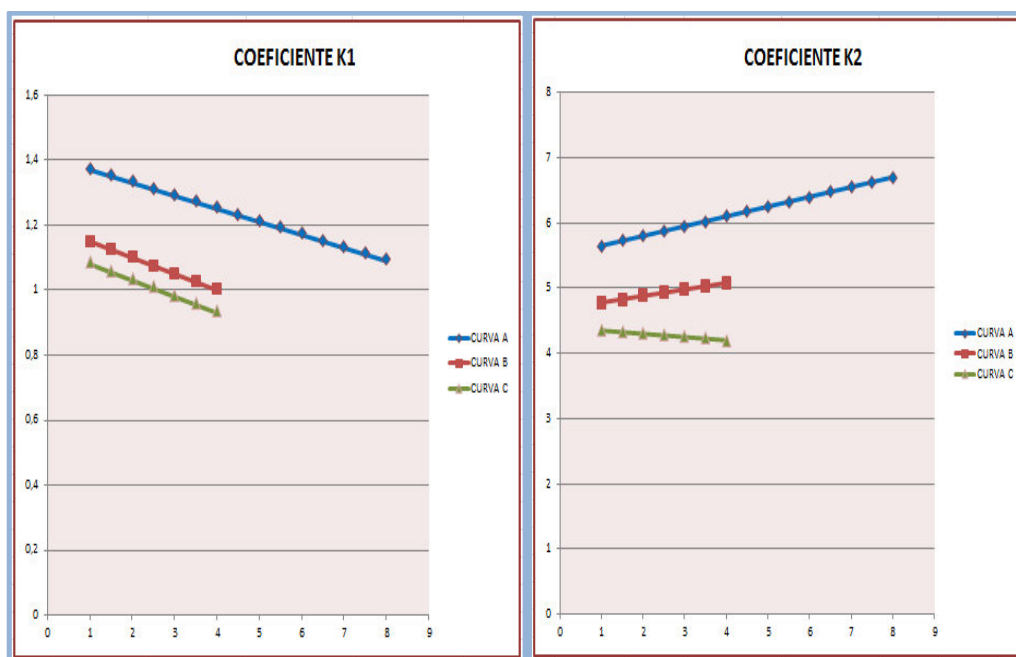


Ilustración 11. Coeficientes de Schwarz

### 5.5.2.7 Fórmulas de Kercel

Las fórmulas de Kercel para la obtención de los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  son las siguientes:



$$k_1 = \frac{\sqrt{a \cdot b}}{2} \cdot 1.84 \cdot \left[ \frac{1}{a} \cdot \ln \left( \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right) + \frac{1}{b} \cdot \ln \left( \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right) + \frac{a}{3 \cdot b^2} + \frac{b}{3 \cdot a^2} - \frac{(a^2 + b^2)}{3 \cdot a^2 \cdot b^2} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \right]$$

$$k_2 = \ln \left( \frac{4(a+b)}{b} \right) + 2 \cdot k_1 \frac{(a+b)}{\sqrt{a \cdot b}} - \frac{\ln \left( a + \sqrt{a^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} \right)}{b/2} - \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{(b/2) + \sqrt{a^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2}}{(-b/2) + \sqrt{a^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2}} \right)$$

Donde

a=Lx Longitud de la malla en la dirección x (m)

b=Ly Longitud de la malla en la dirección y (m)

En la Hoja de Cálculo se podrá elegir entre la utilización de un método u otro. Se recomienda al usuario utilizar el método de Kerckel por ser más preciso

## 5.6 Sexto Paso: Cálculo de la Corriente de Falta

### $I_G$

En la Hoja de Cálculo no realizaremos los cálculos para hallar la corriente de falta  $I_G$  ya que lo tomaremos como dato del contratista por simplicidad. No obstante, se desarrollarán los cálculos brevemente.

Para determinar la máxima corriente de cortocircuito, se debe tomar en consideración la probabilidad de ocurrencia de la falta. Por este motivo, se van a considerar las faltas que estadísticamente ocurren con una mayor frecuencia y el lugar donde ha tenido lugar la falta, es decir, la distancia que hay entre el punto donde produce la falta y la subestación en la que se está diseñando su sistema de puesta a tierra.

Éste es el caso de las faltas monofásicas (80% de los casos) y bifásicas a tierra (15% de los casos). La Hoja de Cálculo, proporciona el valor de estas dos faltas y toma el valor más desfavorable para el diseño de la Puesta a Tierra, es decir, el valor máximo. También, dicha Hoja, da la opción de introducir el valor directamente de la corriente de cortocircuito, en vez de calcularlo por impedancias del sistema ya que, en ocasiones, dicha corriente suele ser un dato ya obtenido en el estudio de cortocircuitos del sistema para evaluar las protecciones.

### 5.6.1 Falta Monofásica a Tierra

Una falta monofásica a tierra, se puede representar por el siguiente circuito:

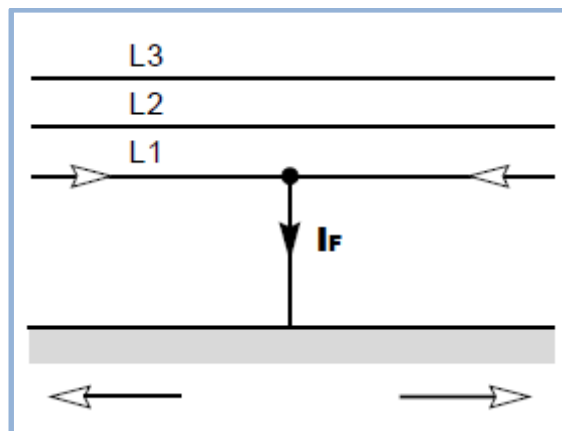


Ilustración 12. Cuaderno Técnico Schneider nº 158

Las secuencias directa, inversa y homopolar están conectadas en serie. Donde la corriente de falta monofásica vendría dada por la expresión:

$$I_{1F} = 3I_0 = 3 \frac{cU_n/3}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Donde

$I_{1F}$ : Corriente falta monofásica (A)

$I_0$ : Corriente homopolar (A)

$U_n$ : Tensión nominal del sistema (V)

$Z_1$ : Impedancia de secuencia directa del sistema ( $\Omega$ )

$Z_2$ : Impedancia de secuencia inversa del sistema ( $\Omega$ )

$Z_0$ : Impedancia de secuencia homopolar del sistema ( $\Omega$ )

$c$ : Factor de tensión. Relación entre la fuente de tensión equivalente y la tensión nominal del sistema  $U_n$  dividida por raíz de 3.

Los valores de este último factor de tensión  $c$  vienen dados en la tabla que se muestra a continuación.

En la mayoría de los casos se toma el valor de factor de tensión máximo ( $c_{\text{máx}}=1,1$ ) ya que da un valor mayor de la corriente de falta que si se cogiera  $c_{\text{mín}}$  y por tanto, se está considerando el caso más desfavorable.

Factor de tensión $c$		
Tensión nominal $U_n$	Factor de tensión $c$ para el cálculo de	
	las corrientes de cortocircuito máximas $c_{\text{máx}}^{1)}$	las corrientes de cortocircuito mínimas $c_{\text{mín}}$
<b>Baja tensión</b> 100 V a 1 000 V (Tabla 1 de la Norma CEI 60038)	1,05 <sup>3)</sup> 1,10 <sup>4)</sup>	0,95
<b>Media tensión</b> > 1 kV a 35 kV (Tabla 3 de la Norma CEI 60038)	1,10	1,00
<b>Alta tensión</b> <sup>2)</sup> > 35 kV (Tabla 4 de la Norma CEI 60038)		
1) $c_{\text{máx}} U_n$ no debería exceder de la tensión más elevada para el material $U_m$ de los sistemas de potencia. 2) Si no está definida la tensión nominal se debería aplicar: $c_{\text{máx}} U_n = U_m$ o $c_{\text{mín}} U_n = 0,9 \times U_m$ . 3) Para sistemas de baja tensión con una tolerancia de +6%, por ejemplo sistemas renombrados de 380 V a 400 V. 4) Para sistemas de baja tensión con una tolerancia de +10%.		

Tabla 5. UNE-EN 60-909-0

## 5.6.2 Falta Bifásica a Tierra

Una falta bifásica a tierra, se puede representar por el siguiente circuito:

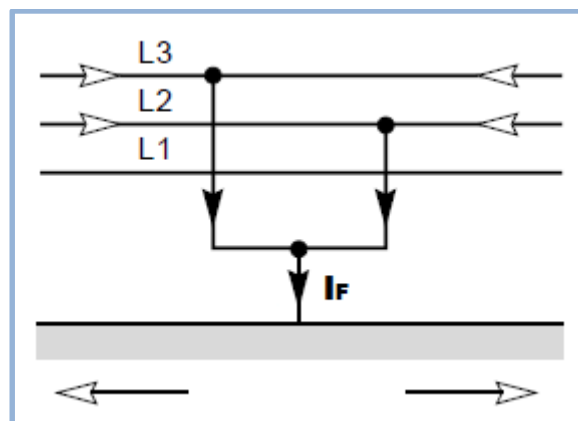


Ilustración 13. Cuaderno Técnico Schneider n° 158

En este caso, las secuencias directa, inversa y homopolar están conectadas en paralelo. Donde la corriente de falta bifásica vendría dada por la expresión:

$$I_{2F} = 3I_{a0} = 3 \frac{Z_2(cU_n/\sqrt{3})}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$$

Donde

$I_{F2}$ : Corriente de falta bifásica a tierra (A)

### 5.6.3 Cálculo de las Impedancias de Secuencia Directa, Inversa y Homopolar

Para calcular estas corrientes de falta necesitaremos conocer el valor de las impedancias directa, inversa y homopolar.

Para mayor sencillez y optando siempre por el caso más desfavorable, el sistema estará formado por dos subestaciones A y B, una línea de transmisión de una longitud determinada en la que hay “n” apoyos. Las dos subestaciones se consideran con el neutro rígido a tierra.

Para el cálculo de las impedancias de las distintas secuencias del sistema, se desprecian las impedancias de los transformadores principales. Las resistencias de puesta a tierra, tanto la de los apoyos como la de las subestaciones A y B, tienen una influencia muy pequeña para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, por lo que no se tendrán tampoco en cuenta.

El siguiente esquema muestra el sistema de estudio:

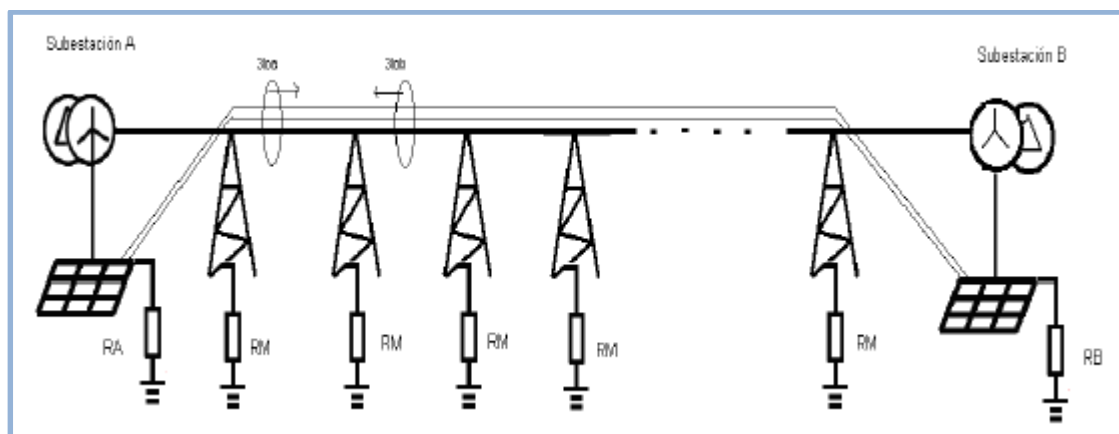


Ilustración 14. UNE-EN 60-909-3

Ante un fallo en la subestación A (subestación de estudio) las redes de secuencia se calcularían de la siguiente manera:

#### 5.6.3.1 Secuencia directa

$$Z_{1L} = Z'_{1L}l$$

$$Z_1 = \frac{Z_{1A}((Z'_{1L}l) + Z_{1B})}{Z_{1A} + Z_{1B} + (Z'_{1L}l)}$$

Donde

$Z_1$ : Impedancia de secuencia directa del sistema ( $\Omega$ )

$Z_{1A}$ : Impedancia de secuencia directa de la subestación A ( $\Omega$ )

$Z_{1B}$ : Impedancia de secuencia directa de la subestación B ( $\Omega$ )

$Z_{1L}$ : Impedancia de secuencia directa de la línea ( $\Omega$ )

$Z'_{1L}$ : Impedancia de secuencia directa de la línea por unidad de longitud ( $\Omega / \text{km}$ )

$l$ : Longitud de la línea (km)

### 5.6.3.2 Secuencia inversa

$$Z_{2L} = Z'_{2L} l$$

$$Z_2 = \frac{Z_{2A}((Z'_{2L}l) + Z_{2B})}{Z_{2A} + Z_{2B} + (Z'_{2L}l)}$$

Donde

$Z_2$ : Impedancia de secuencia inversa del sistema ( $\Omega$ )

$Z_{2A}$ : Impedancia de secuencia inversa de la subestación A ( $\Omega$ )

$Z_{2B}$ : Impedancia de secuencia inversa de la subestación B ( $\Omega$ )

$Z_{2L}$ : Impedancia de secuencia inversa de la línea ( $\Omega$ )

$Z'_{2L}$ : Impedancia de secuencia inversa de la línea por unidad de longitud ( $\Omega / \text{km}$ )

### 5.6.3.3 Secuencia homopolar

$$Z_{0L} = Z'_{0L} l$$

$$Z_0 = \frac{Z_{0A}((Z'_{0L}l) + Z_{0B})}{Z_{0A} + Z_{0B} + (Z'_{0L}l)}$$

Donde

$Z_0$ : Impedancia de secuencia homopolar del sistema ( $\Omega$ )

$Z_{0A}$ : Impedancia de secuencia homopolar de la subestación A ( $\Omega$ )

$Z_{0B}$ : Impedancia de secuencia homopolar de la subestación B ( $\Omega$ )

$Z_{0L}$ : Impedancia de secuencia homopolar de la línea ( $\Omega$ )

$Z'_{0L}$ : Impedancia de secuencia homopolar de la línea por unidad de longitud ( $\Omega / \text{km}$ )

Una vez obtenida la corriente de cortocircuito, habrá que añadir el factor  $D_f$ , calculado en el paso dos, el cual incluye la componente asimétrica (parte continua) de la corriente y el factor  $S_f$  (Split Factor). El factor  $S_f$  se multiplica a la corriente máxima de

cortocircuito para determinar cuál es la parte proporcional de la corriente de falta que se deriva por la malla y despreciar la corriente que se va por otros tramos como el hilo de guarda, transformadores, etc.

#### 5.6.4 Cálculo de $S_f$

Por definición, el Split Factor es el porcentaje de la corriente total de falta que recorre la malla y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S_f = \frac{I_A}{I_F} 100\%$$

Donde

$S_f$ : Split Factor

$I_A$ : Valor absoluto de la corriente que atraviesa la malla (kA)

$I_F$ : Valor absoluto de la corriente de falta asimétrica (kA)

En la Hoja de Cálculo no será necesario calcular el Split Factor debido a que la mayor parte de los proyectos reales hoy en día lo dan como dato de entrada por simplicidad.

#### 5.6.5 Cálculo de la Máxima Corriente que entra en la Malla $I_G$

Una vez que tenemos todos los datos, queda hallar el valor final de la corriente de falta (máxima corriente que pasa por la malla),  $I_G$ . Dicha corriente se define como el producto entre la corriente de falta, el Split factor y el factor de reducción:

$$I_G = I_F S_f D_f$$

### 5.7 Séptimo Paso: Cálculo del GPR (Ground Potential Rise)

En este paso tenemos que calcular y analizar el valor del GPR y compararlo con el valor de la tensión de contacto. Si el valor del GPR en el diseño inicial está por debajo del

valor de la tensión de contacto, no será necesario realizar más análisis para el diseño de la Puesta a Tierra. En el caso de que no se cumpla, habrá que pasar al octavo paso.

El GPR se define como el producto de la resistencia de Puesta a Tierra del sistema,  $R_g$ , y la máxima corriente que pasa por la malla,  $I_G$ .

$$GPR = I_G R_g$$

## 5.8 Octavo Paso: Cálculo de la Máxima Tensión de Contacto y de Paso

A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo de las tensiones de paso y de contacto. Éstas sólo se podrán aplicar en el caso de considerar una resistividad del suelo uniforme.

### 5.8.1 Máxima Tensión de Contacto ( $E_m$ )

La máxima tensión de contacto también es conocida como tensión de malla.

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M}$$

Donde

$K_m$ : Factor geométrico

$K_i$ : Factor de corrección

$\rho$ : Resistividad del terreno uniforme

$I_G/L_M$ : Corriente media por unidad de longitud efectiva enterrada de los conductores (A/m)

Los factores geométrico y de corrección se calculan de la siguiente manera:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right]$$

Con:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

En el caso de que las picas se encuentren a lo largo del perímetro o en las esquinas  $K_{ii}=1$ . Para  $K_h$  tomamos  $h_0 = 1\text{ m}$  (profundidad que se toma de referencia).

### 5.8.2 Tensión de Paso

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s}$$

Donde

$\rho$ : Resistividad del terreno uniforme

$K_i$ : Factor de corrección

$K_s$ : Factor geométrico

$L_s$ : Longitud efectiva de cable enterrado (m)

El valor de la longitud efectiva de cable enterrado ( $L_s$ ), ya sea un mallado con o sin picas es:

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R$$

Donde

$L_c$ : Longitud total de los conductores. (m)

$L_R$ : Longitud total de las picas. (m)

El factor geométrico viene dado por:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

Donde

$D$ : Distancia máxima entre conductores paralelos (m)

$h$ : Profundidad a la que se encuentra la malla enterrada (m)

La fórmula utilizada para el cálculo de  $K_s$  sólo es válida para cables enterrados a una profundidad comprendida entre 0,25m y 2,5m.



## 5.9 Noveno Paso: Comprobación del Diseño

En este último paso se comprobará si el diseño de la Puesta a Tierra es correcto y seguro. En caso afirmativo se pasaría a la Ingeniería de Detalle. En caso negativo, el diseño no cumple con los límites establecidos y tendríamos que modificarlo.

Para la comprobación del diseño es necesario cumplir con dos condiciones:

- La tensión de contacto de la malla ( $E_m$ ) tiene que ser menor que la tensión de contacto admisible ( $E_{touch}$ ).
- La tensión de paso ( $E_s$ ) calculada en el paso número ocho, tiene que ser menor que la tensión de paso admisible ( $E_{step}$ ).

Según como vimos al inicio de este Diseño de la Hoja de Cálculo:

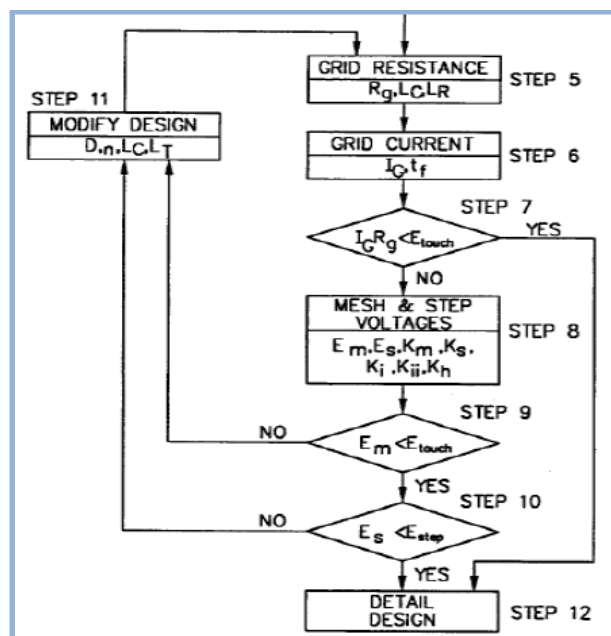


Ilustración 15. IEEE 80-2000

## 6. Manual de la Hoja de Cálculo

En este capítulo, se pretende explicar al usuario cómo se debe utilizar la Hoja de Cálculo creada.

Los valores que aparecen en azul enmarcados, son los datos que tiene que introducir el usuario. Los que están en color negro los calcula el programa. Los datos en negrita son datos de especial interés a lo largo de la Hoja de Cálculo.

### 6.1 Paso 0. Datos de Entrada

Muchos de los datos de entrada que proporciona el proyecto real, se repiten durante los cálculos. Por lo que, por simplicidad para el usuario, hay una pestaña Datos\_Entrada donde se introducirán dichos datos una sola vez. En esta pestaña no se realizarán cálculos.

<b>1.-Datos (típicos) para el diseño de la Puesta a Tierra</b>				
Tiempo de falta $t_s$ :				
Tensión de red $U_n$				
Intensidad máxima de corriente de defecto a tierra $I_f$				
Split factor $S_f$ :				
Resistividad capa superficial $\rho_s$ :				
Profundidad de la capa superficial $h_s$ :				
Profundidad a la que están enterrados los conductores $h$				
(*)Máxima longitud de la malla en la dirección $x$ $L_x$				
(*)Máxima longitud de la malla en la dirección $y$ $L_y$				
(*)Número de picas $n_R$				
Relación $X/R$				
Frecuencia de red				
(*) Si no lo dan como dato de diseño, acudir a los planos				

Ilustración 16

## 6.2 Paso 1. Resistividad del Terreno

Para el cálculo de la resistividad, sólo se dispone del modelo de resistividad uniforme. Estos cálculos pueden verse en la pestaña Resistividad\_Terreno de la Hoja de Cálculo.

1.- Modelo de resistividad uniforme			
Valores medidos de resistividad:			
Distancia entre electrodos:	insertar valores en Tabla 1		
Número de medidas:			
Resistividad aparente 1:			
Resistividad aparente 2:			
Resistividad aparente p <sub>a</sub> :			

Ilustración 17

El usuario, para obtener el valor de la resistividad del terreno en la Hoja de Cálculo, sólo tendrá que introducir en la tabla los valores de resistividad medios conseguidos en la práctica en la zona de estudio, en función de la profundidad de la medida.

Tabla 1			
Medida Número	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Distancia entre electrodos	
1			MAX
2			MIN
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Ilustración 18

El número máximo de valores a introducir son setenta. Este valor nunca se superará ya que es inusual que se obtenga más valores en la práctica.

Finalizado lo descrito anteriormente, el programa arroja el valor de la resistividad aparente del terreno. Con este valor, se calcularán muchos de los parámetros necesarios para el diseño de la Puesta a Tierra.

## 6.3 Paso 2. Cálculo de la Sección del Conductor

Este apartado, se divide en 2 partes: la primera calcula la sección del conductor; la segunda, proporciona la opción de considerar la componente asimétrica de la corriente.

Estos cálculos se encuentran en la pestaña Conductor.

En el primer apartado, habrá que elegir el tipo de conductor que se quiere para la Puesta a Tierra entre los que aparecen en la Hoja de Cálculo (datos obtenidos de la norma IEE 80-2000).

Descripción
100 Copper, annealed soft-drawn
101 Copper, commercial hard-drawn
102 Copper-clad steel wire
103 Copper-clad steel rod
104 Aluminum, EC grade
105 Aluminum, 5005 alloy
106 Aluminum, 6201 alloy
107 Aluminum-clad steel wire
108 Steel, 1020
109 Stainless-clad steel rod
110 Zinc-coated steel rod
111 Stainless steel, 304

**Ilustración 19**

Es necesario introducir el valor de la temperatura ambiente para que el programa sea capaz de obtener la sección mínima normalizada.

<b>1.-Datos Generales</b>			
Descripción cable :			
Temperatura ambiente :			
Intensidad de falta (valor eficaz):			
Tiempo de duración de la falta:			
Conductividad del material:			
Coeficiente de resistividad térmico a 20°C:			
K <sub>0</sub> :			
Temperatura de fusión:			
Resistividad pr a 20°C			
Capacidad térmica TCAP:			
Sección mínima:			
<b>Sección mínima normalizada:</b>			

Ilustración 20

Como ya se anunció al principio del paso 2, la Hoja de Cálculo proporciona la opción de tener en cuenta la componente asimétrica (continua) de la corriente. Se recomienda al usuario utilizar esta opción, siempre y cuando disponga de los datos necesarios, ya que el uso del factor  $D_f$  se inclina hacia el lado de la seguridad en el diseño.

<b>2.- DC Offset de la Corriente</b>			
Considerar:			
Frecuencia de red:			
Tiempo de falta:			
Relación X / R:			
Constante tiempo del DC offset Ta			
Factor de reducción Df:			
Intensidad corriente asimétrica:			
Sección mínima:			
<b>Sección mínima normalizada:</b>			

Ilustración 21

## 6.4 Paso 3. Diseño Inicial

En el diseño inicial, el programa deduce parámetros necesarios para calcular posteriormente las tensiones del mallado. El usuario tendrá que elegir una de las tres formas que se ofrecen en la Hoja de Cálculo: cuadrada, rectangular o forma de L. La elección de una u otra dependerá de la forma que más se aproxime a la malla real.

Los datos de entrada difieren entre una forma y otra, básicamente son: número de conductores, longitud de estos, número y longitud de las picas de la malla (en la hoja aparece un catálogo de referencias de picas), etc.

Los datos a introducir en las 3 formas que se ofrecen son los siguientes:

1.-Diseño Cuadrado	
Longitud del lado de la malla L:	
Área total A:	
Número de conductores:	
Espacio entre conductores D:	
Perímetro Lp:	
Longitud total conductores Lc:	
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	
Factor geométrico na:	
Factor geométrico nb:	
Factor geométrico nc:	
Factor geométrico nd:	
Factor geométrico n:	
Factor corrección geométrico Ki:	
Número de picas n <sub>R</sub> :	
Longitud pica L <sub>r</sub> :	
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	
Diámetro pica 2b:	

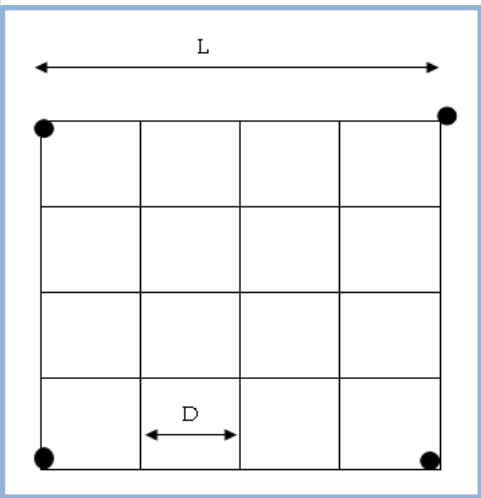


Ilustración 22

## 2.-Diseño Rectangular:

Longitud del lado de la malla $L_x$ :	
Longitud del lado de la malla $L_y$ :	
Área total $A$ :	
Número de conductores en $x$ :	
Espacio entre conductores $D_y$ :	
Número de conductores en $y$ :	
Espacio entre conductores $D_x$ :	
Espacio medio entre conductores $D$ :	
Perímetro $L_p$ :	
Longitud total conductores $L_c$ :	
Distancia máxima entre dos puntos $D_m$ :	
Factor geométrico $n_a$ :	
Factor geométrico $n_b$ :	
Factor geométrico $n_c$ :	
Factor geométrico $n_d$ :	
Factor geométrico $n$ :	
Factor corrección geométrico $K_i$ :	
Número de picas $n_R$ :	
Longitud pica $L_r$ :	
Longitud picas total $L_R$ :	
Longitud total efectiva $L_M$ :	
Diámetro pica $2b$ :	

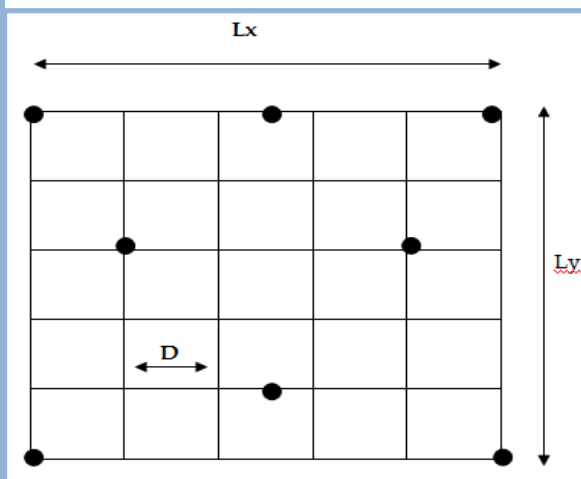


Ilustración 23

## 3.-Diseño en L:

Longitud del lado de la malla $L_x$ :	
Longitud del lado de la malla $L_y$ :	
Área total $A$ :	
Número de conductores en $x$ :	
Espacio entre conductores $D_y$ :	
Número de conductores en $y$ :	
Espacio entre conductores $D_x$ :	
Espacio medio entre conductores $D$ :	
Perímetro $L_p$ :	
Longitud total conductores $L_c$ :	
Distancia máxima entre dos puntos $D_m$ :	
Factor geométrico $n_a$ :	
Factor geométrico $n_b$ :	
Factor geométrico $n_c$ :	
Factor geométrico $n_d$ :	
Factor geométrico $n$ :	
Factor corrección geométrico $K_i$ :	
Número de picas $n_R$ :	
Longitud pica $L_r$ :	
Longitud picas total $L_R$ :	
Longitud total efectiva $L_M$ :	
Diámetro de la pica $2b$ :	

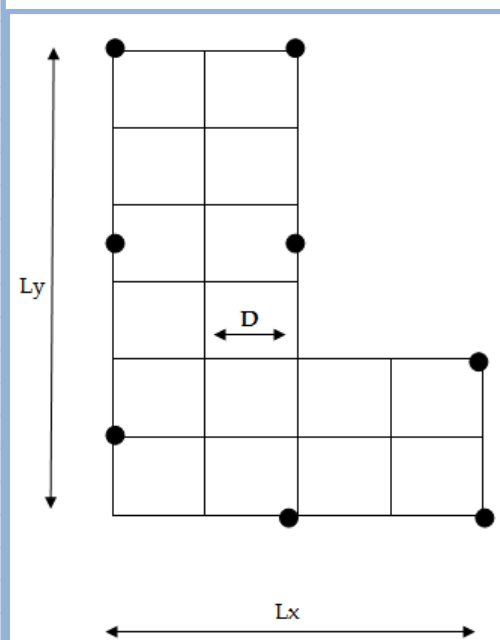


Ilustración 24

## 6.5 Paso 4. Cálculo de $E_{\text{touch}}$ y $E_{\text{step}}$ Admisibles

Este paso permite calcular los valores límites admisibles de la tensión de contacto y de paso que no podrán superar las tensiones de la malla posteriormente calculadas. Dependiendo de la normativa que se quiera utilizar, es decir; IEEE 80-2000 o MIE-RAT 13, se obtendrán unos valores u otros.

Estos cálculos los podremos encontrar en la pestaña Etouch\_Estep de la Hoja de Cálculo.

Como consejo al usuario, por lo general, MIE-RAT 13 da tensiones de contactos más pequeñas y tensiones de paso mucho más mayores que la norma IEEE 80-2000.

Si se elige MIE-RAT 13, con sólo la entrada del tiempo de falta ya se obtienen los valores requeridos.

Si la norma elegida es IEEE 80-2000, se requieren más datos de entrada. Hay que elegir entre una persona de 50 kg ó de 70 kg. Además el programa, indica al usuario que si no existe capa superficial, el valor de la resistividad superficial es el mismo que el de la resistividad del terreno general.

<b>1.-Cálculo según IEEE 80-2000</b>				
Peso de la persona:				
Resistividad capa superficial $\rho_s$ :				
Resistividad del terreno $\rho$ :				
Profundidad de la capa superficial $h_s$ :				
Factor reductor de la capacidad normal $C_s$ :				
Tiempo de descarga $t_s$ :				
Corriente de descarga máxima admisible (Dalziel's):				
Corriente de descarga máxima admisible (Curva Z):				
Corriente de descarga máxima admisible:				
Tensión metal-metal $E_{mm}$ :				
<b>Tensión de contacto admisible:</b>				
<b>Tensión de paso admisible:</b>				
<b>2.- Cálculo según MIE-RAT 13</b>				
Tensión de contacto:				
Tensión de paso:				

Ilustración 25



## 6.6 Paso 5. Resistencia de Puesta a Tierra

El objetivo de este apartado es obtener la resistencia de Puesta a Tierra de nuestro diseño. Para ello, se ha considerado dos tipos de malla: uno, el que no existen picas (poco frecuente) y un segundo, en el que se combina conductores enterrados con picas.

Estos cálculos los podremos encontrar en la pestaña Resistencia\_PAT de la Hoja de Cálculo.

Para el mallado sin picas, se introducen el tipo de diseño inicial que se ha elegido en el paso anterior y la profundidad a la que están enterrados los conductores. Con esta información, el programa es capaz de dar un valor de la resistencia de Puesta a Tierra.

<b>SÓLO MALLA (sin picas)</b>			
Diseño inicial Puesta a Tierra:			
Área total A:			
Resistividad del terreno $\rho$ :			
Profundidad de enterrado conductor h:			
Longitud total de los conductores $L_c$ :			
Resistencia de PAT malla $R_g$ :			

Ilustración 26

Si se desea combinar malla y picas, la Hoja de Cálculo, proporciona la resistencia de los conductores y de las picas por separado, la resistencia mutua entre conductor y pica, y por último, el valor final de la resistencia de Puesta a Tierra. Además, en este apartado se podrá elegir el método de cálculo para los coeficientes  $K_1$  y  $K_2$ :

<b>1.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Conductores Enterrados</b>					
Resistividad del terreno:					
Diseño inicial Puesta a Tierra:					
Longitud total de los conductores $L_c$ :					
Profundidad de enterrado conductor $h$ :					
Diámetro del conductor $d$ :					
Radio efectivo conductor $a'$ :					
Área total del mallado $A$ :					
1) Curvas de Schwarz					
Tipo de Curva:					
Coeficiente $k_1$ :					
Coeficiente $k_2$ :					
2) Kercel					
Coeficiente Kercel $k_1$ :					
Coeficiente Kercel $k_2$ :					
Método de cálculo:					
$k_1$ :					
$k_2$ :					
Resistencia PAT conductor $R_1$ :					
<b>2.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Picas</b>					
Resistividad del terreno:					
Diseño inicial Puesta a Tierra:					
Longitud de cada pica $L_r$ :					
Diámetro pica $2b$ :					
Número de picas $n_R$ :					
Longitud total picas $L_R$ :					
Resistencia PAT picas $R_2$ :					
<b>3.- Cálculo Resistencia Mutua Puesta a Tierra</b>					
Resistencia PAT mutua $R_m$ :					
<b>4.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra</b>					
Resistencia PAT $R_g$ :					

Ilustración 27

## 6.7 Paso 6. Corriente de Falta $I_g$ y Máxima Elevación del Potencial de la Malla (GPR)

Para calcular la máxima corriente de falta que llega a la subestación necesitaremos conocer tres parámetros: el valor eficaz de la corriente de falta, el factor de decremento

(Df) que considera la componente continua de la corriente y el Split Factor (Sf) que define el porcentaje de la corriente total que afecta al cálculo de la instalación.

El máximo valor eficaz de la corriente de falta, así como el Split factor son datos de entrada. El parámetro Df se calculó en el paso 2.

Una vez introducidos los datos necesarios, el usuario tiene que rellenar si quiere tener en cuenta el valor de Df y Sf.

El usuario dispondrá del valor de la corriente que pasa a través de su malla ( $I_G$ ) y del máximo potencial que hay en ella (GPR).

Estos cálculos los podremos encontrar en la pestaña Ig\_GPR de la Hoja de Cálculo.

<b>1.- Datos de Entrada</b>			
Corriente falta $I_F$ :			
Split factor Sf:			
Tipo de Resistencia de PAT			
Resistencia puesta a tierra $R_{pat}$ :			
<b>2.- Cálculo de Df</b>			
Factor de reducción Df:			
<b>3.- Cálculo Corriente <math>I_G</math></b>			
Considerar factor Df:			
Considerar factor Sf:			
Corriente $I_G$ :			
<b>4.- Cálculo Ground Potential Rise GPR</b>			
GPR:			

Ilustración 28

Al final de esta pestaña, el programa hace un balance en el que comprueba si con estos valores obtenidos ya se ha conseguido un diseño de la Puesta a Tierra correcto. Para ello, el GPR tendrá que ser menor que  $E_{touch}$ .

¿GPR = < Etouch = ?

Ilustración 29

## 6.8 Paso 7. Tensión de Contacto y Tensión de Paso de la Malla. $E_m$ y $E_s$

En el caso de que  $GPR > E_{touch}$  en el apartado anterior, será preciso calcular las tensiones de malla y de contacto que aparecerían en la malla que se quiere diseñar.

Para su cálculo, bastará con introducir los valores que se piden en la hoja. Uno de los datos de entrada es el tipo de mallado. Las opciones son: sin picas, picas no localizadas en las esquinas, picas en las esquinas y picas situadas a lo largo del perímetro de la malla.

Estos datos los podremos encontrar en la pestaña Em\_Es de la Hoja de Cálculo.

<b>1.-Datos Generales</b>			
Resistividad del terreno $\rho$ :			
Diseño inicial puesta a tierra:			
Distancia entre conductores D:			
Diámetro del conductor d:			
Profundidad cable enterrado h:			
Factor geométrico n:			
Tipo de mallado:			
Factor $K_{ii}$ :			
Factor $K_h$ :			
Factor $K_m$ :			
Factor geométrico $K_i$ :			
Factor geométrico $K_s$ :			
Corriente de falta $I_G$ :			
Longitud total efectiva $L_M$ :			
Longitud total conductores $L_c$ :			
Longitud picas total $L_R$ :			
Longitud efectiva $L_s$ :			
<b>Tensión de malla <math>E_m</math>:</b>			
<b>Tensión de paso <math>E_s</math>:</b>			

Ilustración 30

## 6.9 Paso 8. Validación

La conclusión final a la que se llega con el programa es si el diseño de Puesta a Tierra que se ha realizado, es correcto, es decir, que cumple con los valores establecidos de las tensiones de paso y de contacto establecidos por la norma.

El programa tiene que asegurar que se cumplen dos condiciones:

- La máxima tensión de contacto de la malla  $E_m$  debe ser menor que la tensión de contacto admisible  $E_{touch}$ .
- La tensión de paso  $E_s$  de la malla debe ser menor que la tensión de paso  $E_{step}$ .

Si las dos condiciones se cumplen, el diseño de la Puesta a Tierra es correcto. En el caso que no se cumpla alguna de las dos, habrá que rediseñar la Puesta a Tierra hasta que se consiga cumplir con los valores que rige la norma.

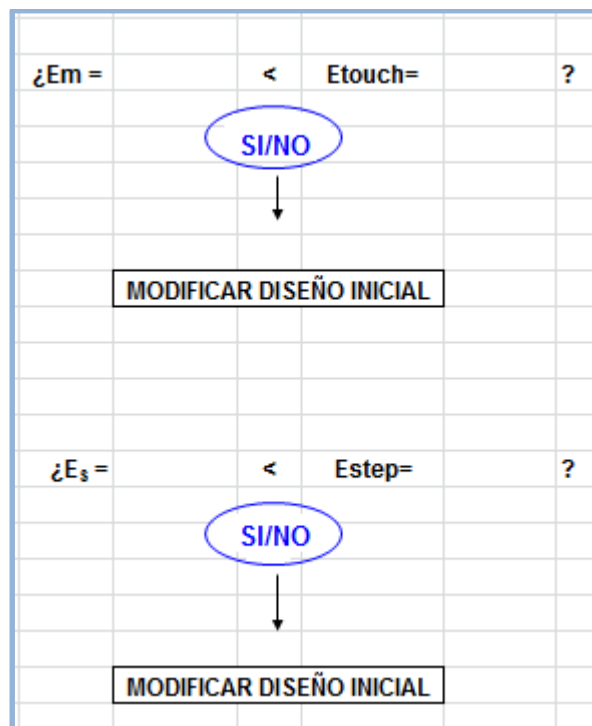


Ilustración 31

## 7. Aplicación Real de la Hoja de Cálculo

La aplicación que se va a realizar sobre la Hoja de Cálculo es un caso real. Se trata, de una central más la subestación correspondiente. El análisis de la red de tierras se hará solamente a la subestación ya que es para lo que está preparada la Hoja de Cálculo.

La subestación está conectada a la red de distribución de energía eléctrica a una tensión de red de 132 KV. Las características de la red vienen dadas por la compañía a la cual pertenece, cuyo nombre no se nombrará por motivos de confidencialidad.

### 7.1 Datos de Entrada

Tenemos varios tipos de datos de entrada: datos para el diseño de la puesta a tierra, datos de la línea a la que está conectada la subestación y los planos de la central y la subestación.

#### 7.1.1 Datos del Diseño

Los datos de diseño de los cuales se disponen se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Tiempo de falta $t_s$	0.5s
Tensión de la red $U_n$	132 kV
Intensidad máxima de corriente de defecto a tierra $I_F$	10 kA
Tipo de puesta a tierra	Rígido a tierra
Factor de división de corriente $S_f$	80,516%
Resistividad del terreno $\rho$	Ver tabla de Resistividad
Resistividad capa superficial $\rho_s$	3000 $\Omega \cdot m$ (wet gravel resistivity)
Profundidad de la capa superficial $h_s$	0.1 m
Profundidad a la que están enterrados los conductores $h$	1 m
Longitud del conductor en la dirección x $L_x$	Ver plano
Longitud del conductor en la dirección y $L_y$	Ver plano
Número de picas $nR$	Ver plano
Tipo de pica	Ac-Cu $d=17.3$ mm; $L=2500$ mm
Relación X/R	10
Frecuencia de red	50 Hz

Tabla 6. Datos de diseño

## 7.1.2 Datos Resistividad

Los datos de resistividad de los que se dispone son distintas muestras que se han tomado del terreno a diferentes profundidades. Cada tabla corresponde a un nivel de profundidad. En ellas se muestra el número de medida junto con la correspondiente resistividad en  $\Omega \cdot m$  y la profundidad a la que se ha tomado el valor de la resistividad en metros.

En las medidas donde aparece un asterisco (\*), no son consideradas porque son valores que carecen de sentido y por tanto ha sido una medida de la resistividad del terreno errónea.

Nivel de profundidad (m)											
0-1,4	Nº de medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	16,3 6	5,72	(*)	7,90	23,7 0	22,8 0	21,30	37,9 0	12,70	54,60
	Profundidad (m)	0,50	1,37		1,30	0,80	1,20	1,10	0,60	0,41	1,20

Nivel de profundidad (m)											
1,4-3	Nº de medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	(*)	0,54	38,7 5	(*)	2,75	3,76	1,90	5,20	3,58	71,60
	Profundidad (m)		2,52	3,00		1,70	2,70	2,60	1,48	2,40	1,80

Nivel de profundidad (m)											
3-7	Nº de medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	2,90	210, 50	11,5 0	3,50	(*)	2,04	(*)	(*)	(*)	(*)
	Profundidad (m)	4,60	5,90	6,10	5,50		6,20				

Nivel de profundidad (m)											
7-15	Nº de medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	(*)	(*)	(*)	165,00	6,20	139,00	94,20	18,00	12,40	(*)
	Profundidad (m)				12,90	14,80	14,10	11,60	8,80	14,30	

Nivel de profundidad (m)											
15-31	Nº de medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	28,18	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	6,20	(*)	(*)	124,60
	Profundidad (m)	15,10						26,90			18,20

Nivel de profundidad (m)											
31-63	Nº de medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	9,08	(*)	20,40	(*)	(*)	6,39	(*)	26,40	30,72	(*)
	Profundidad (m)	34,20		40,30			32,00		57,80	33,40	

Tabla 7. Datos de resistividad y profundidades

### 7.1.3 Datos de la Línea de Distribución

Datos de la línea	
Distancia entre subestaciones	LT = 50.05 km
Resistencia de los apoyos colindantes	a = 325 m
Vano medio	RT = 60 $\Omega$
Datos de los conductores de fase de las líneas	
Tipo	LA-280
Radio	rf= 10.9 mm
Datos de los conductores de tierra	
Tipo	AC-9.8 (3+9)
Sección	Sq=52.9 mm <sup>2</sup>
Radio	rq=4.925 mm
Resistencia	R <sub>q</sub> =3.67 $\Omega$ /km
Permeabilidad relativa del material	$\mu_q$ =75

Tabla 8. Datos de la línea de distribución



## 7.1.4 Planos

El contratista, que por confidencialidad no se mencionará su nombre, nos ha proporcionado dos planos que se adjuntan en el anexo 1.

El plano uno corresponde a la central y a su subestación adyacente. La marca roja indica la superficie de estudio (la subestación).

El plano dos, muestra solamente la subestación. En ella, se puede ver, la disposición de los cables de tierra y de las picas.

## 7.2 Cálculos con la Hoja de Cálculo

### 7.2.1 Resistividad del Terreno

Para el cálculo de la resistividad se colocará en la Hoja de Cálculo la media de los valores para cada una de las profundidades que aparecen en la tabla. Los valores a introducir son:

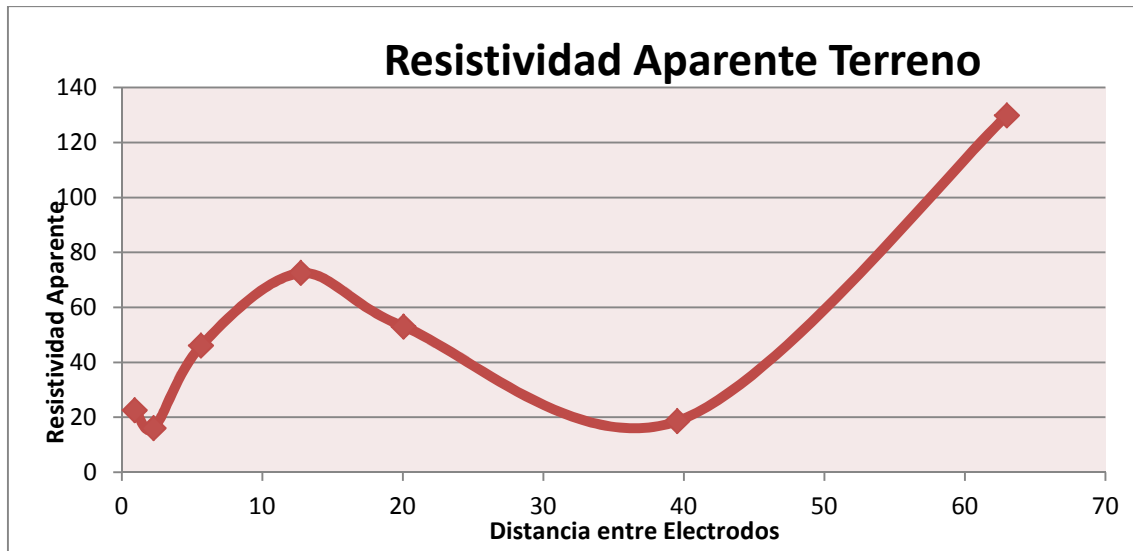
<b>Resistividad (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>	22,553	16,010	46,088	72,467	52,993	18,598	129,784
<b>Profundidad (m)</b>	0,942	2,275	5,660	12,750	20,067	39,540	63,000

**Tabla 9. Media de las resistividades del terreno**

La resistividad obtenida en la Hoja de Cálculo mediante el modelo de resistividad uniforme tienen un valor de  $\rho_a = 72.897 \Omega \cdot m$  que corresponde a un nivel de resistividad bajo, lo que dará lugar a una resistencia de Puesta a Tierra de la subestación no muy alta, favorable para el cálculo del GPR y las tensiones de paso y de contacto.

<b>1.- Modelo de resistividad uniforme</b>					
Valores medidos de resistividad:					
Distancia entre electrodos:	insertar valores en Tabla 1				
Número de medidas:				7	
Resistividad aparente 1:				51,21329	$\Omega \cdot m$
Resistividad aparente 2:				72,897	$\Omega \cdot m$
Resistividad aparente $\rho_a$ :				72,897	$\Omega \cdot m$

**Ilustración 32**



### 7.2.2 Cálculos del conductor

Elegimos el tipo de conductor de tierra “Copper annealed soft-drawn” e introducimos los datos que se piden. La sección del conductor normalizado es de 35 mm<sup>2</sup>.

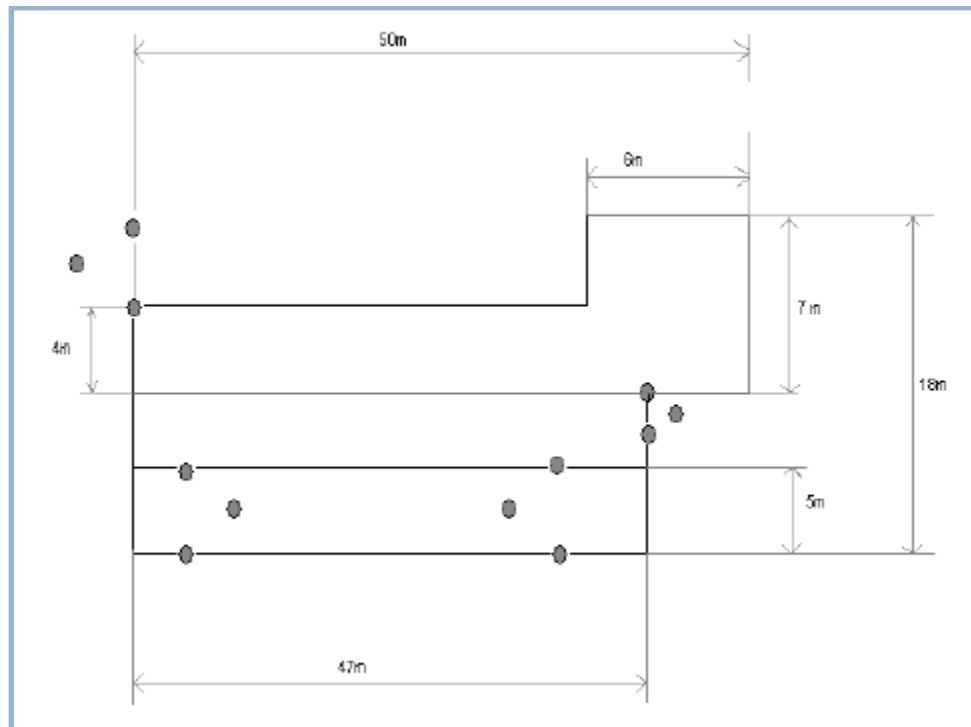
Como el tiempo de falta es menor que un segundo y la relación X/R es mayor que cinco, habrá que tener en cuenta la componente asimétrica de la corriente ( $Df=1.03134$ ).

<b>1.-Datos Generales</b>			
Descripción cable :	100 Copper, annealed soft-drawn		
Temperatura ambiente :	40	°C	
Intensidad de falta (valor eficaz):	10	kA	
Tiempo de la falta:	0,5	s	
Conductividad del material:	100	%	
Coeficiente de resistividad térmico a 20°C:	0,00393	°C <sup>-1</sup>	
K <sub>0</sub> :	234	°C	
Temperatura de fusión:	1083	°C	
Resistividad pr a 20°C	1,72	μΩ·cm	
Capacidad térmica TCAP:	3,42	J/(cm3·°C)	
Sección mínima:	25,089089	mm²	
<b>Sección mínima normalizada:</b>	<b>35</b>	<b>mm²</b>	
<b>2.- DC Offset de la Corriente</b>			
Considerar:	Si		
Frecuencia de red:	50	Hz	
Tiempo de falta:	0,5	s	
Relación X / R:	10		
Constante tiempo del DC offset Ta	0,031831	s	
Factor de reducción Df:	1,0313399		
Intensidad corriente asimétrica:	10,313399	kA	
Sección mínima:	25,875378	mm²	
<b>Sección mínima normalizada:</b>	<b>35</b>	<b>mm²</b>	

Ilustración 33

### 7.2.3 Diseño Inicial

El diseño inicial se estudiará con la subestación (plano 2). Simplificando el plano, el diseño de la Puesta a Tierra sería como el que se muestra a continuación (las medidas han sido obtenidas del plano).



**Ilustración 34**

La norma IEEE 80-2000, como vimos anteriormente, sólo permite tres tipos de formas en el diseño: cuadrado, rectangular o en forma de L. Debido a esto, habrá que simplificar la forma que se tiene de la subestación a un rectángulo de 47 m de largo y 15 m de alto.

Se ha reducido el tamaño de la forma rectangular ya que es más desfavorable que tomando un rectángulo mayor. Es decir, si se realizan los cálculos para un buen diseño de Puesta a Tierra con el rectángulo propuesto anteriormente, también cumplirá para un rectángulo con mayores dimensiones.

Otro motivo por el que no se puede usar la norma IEEE 80-2000 es porque los cálculos que realiza la norma son válidos cuando los conductores de la Puesta a Tierra se encuentran equidistantes entre ellos. En este caso, no es así, por lo que al haber cuatro conductores en el eje X y considerar una altura del rectángulo de 15 metros, se tomará una distancia equidistante entre ellos de 5 metros.

En cuanto a las picas, se considerará que las 12 están en el perímetro de la malla por restricciones de la IEEE 80-2000 (aunque en realidad no es así). Estas restricciones siempre se inclinan hacia el lado más desfavorable para garantizar mayor seguridad.

Con estas consideraciones, el diseño inicial para la Hoja de Cálculo posee las siguientes dimensiones:

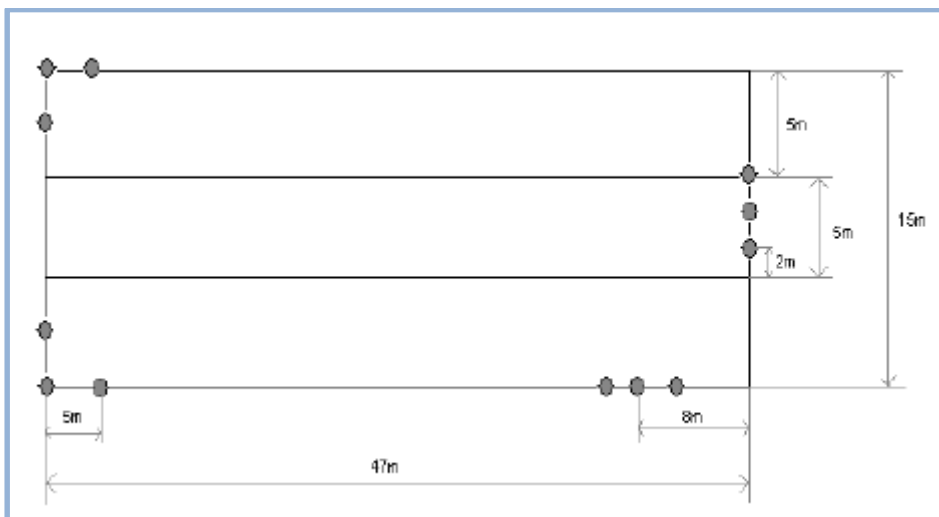


Ilustración 35

2.-Diseño Rectangular:			
Longitud del lado de la malla Lx:	47	m	
Longitud del lado de la malla Ly:	15	m	
Área total A:	705	m <sup>2</sup>	
Número de conductores en x:	4		
Espacio entre conductores Dy:	5	m	
Número de conductores en y:	2		
Espacio entre conductores Dx:	47	m	
Espacio medio entre conductores D:	26	m	
Perímetro Lp:	124	m	
Longitud total conductores Lc:	218	m	
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	49,335586	m	
Factor geométrico na:	3,516129		
Factor geométrico nb:	1,0805219		
Factor geométrico nc:	1		
Factor geométrico nd:	1		
Factor geométrico n:	3,7992544		
Factor corrección geométrico Ki:	1,2062896		
Número de picas n <sub>R</sub> :	12		
Longitud pica L <sub>r</sub> :	2,5	m	
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	30	m	
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	266,35465	m	
Diámetro pica 2b:	0,0173	m	

Ilustración 36

## 7.2.4 Tensiones de Paso y de Contacto

Haremos los cálculos según la normativa IEEE 80-2000 para una persona de 70 Kg.

Las tensiones de paso y de contacto admisibles obtenidas son  $E_{\text{touch}70} = 918,6295 \text{ V}$  y  $E_{\text{step}70} = 3008,4234 \text{ V}$ .

La tensión de paso resulta relativamente alta debido a la resistividad de  $3000 \Omega \cdot \text{m}$  de la capa superficial que se ha requerido.

<b>1.-Cálculo según IEEE 80-2000</b>			
Peso de la persona:	70	kg	
Resistividad capa superficial $\rho_s$ :	3000	$\Omega \cdot \text{m}$	
Resistividad del terreno $\rho$ :	72,897	$\Omega \cdot \text{m}$	
Profundidad de la capa superficial $h_s$ :	0,1	m	
Factor reductor de la capacidad normal $C_s$ :	0,697196241		
Tiempo de descarga $t_s$ :	0,5	s	
Corriente de descarga máxima admisible (Dalziel's):	222,03153	mA	
Corriente de descarga máxima admisible (Curva Z):	431,25	mA	
Corriente de descarga máxima admisible:	222,03153	mA	
Tensión metal-metal $E_{\text{mm}}$ :	222,03153	V	
<b>Tensión de contacto admisible:</b>	<b>918,62949</b>	<b>V</b>	
<b>Tensión de paso admisible:</b>	<b>3008,42339</b>	<b>V</b>	

Ilustración 37

## 7.2.5 Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra

En este apartado habrá que utilizar la opción del cálculo de Puesta a Tierra que tiene en cuenta los conductores y las picas, que es el más frecuente. Además se va a utilizar el método de Kerckel para obtener los coeficientes.

El valor de la resistencia de Puesta a Tierra que aporta la Hoja de Cálculo es de  $R_g = 1.1466 \Omega$

<b>COMBINACIÓN DE MALLA Y PICAS</b>			
<b>1.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Conductores Enterrados</b>			
Resistividad del terreno:	72,897	$\Omega \cdot m$	
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2 Rectangular		
Longitud total de los conductores $L_c$ :	218	m	
Profundidad de enterrado conductor $h$ :	1	m	
Diámetro del conductor $d$ :	0,010998	m	
Radio efectivo conductor $a'$ :	0,105	m	
Área total del mallado $A$ :	705	m <sup>2</sup>	
1) Curvas de Schwarz			
Tipo de Curva:	1 CURVA A		
Coefficiente $k_1$ :	1,284666667		
Coefficiente $k_2$ :	5,97		
2) Kercel			
Coefficiente Kercel $k_1$ :	1,266812057		
Coefficiente Kercel $k_2$ :	7,956012103		
Método de cálculo:	Kercel		
$k_1$ :	1,266812057		
$k_2$ :	7,956012103		
Resistencia PAT conductor $R_1$ :	1,147166534	$\Omega$	
<b>2.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Picas</b>			
Resistividad del terreno:	72,897	$\Omega \cdot m$	
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2 Rectangular		
Longitud de cada pica $L_r$ :	2,5	m	
Diámetro pica $2b$ :	0,0173	m	
Número de picas $n_R$ :	12		
Longitud total picas $L_R$ :	30	m	
Resistencia PAT picas $R_2$ :	102,7722459	$\Omega$	
<b>3.- Cálculo Resistencia Mutua Puesta a Tierra</b>			
Resistencia PAT mutua $R_m$ :	0,916052961	$\Omega$	
<b>4.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra</b>			
Resistencia PAT $R_g$ :	1,14664	$\Omega$	

Ilustración 38

## 7.2.6 Corriente de Falta y Máximo Potencial en la Malla

En esta pestaña de la Hoja de Cálculo se calculará la máxima corriente de falta  $I_G$  donde el usuario podrá elegir si se tendrán en cuenta el factor de reducción  $D_f$  y el Split Factor  $S_f$ . Se recomienda tener en cuenta ambos factores.

Además, la Hoja de Cálculo proporciona el valor del máximo potencial en la malla (GPR).

<b>1.- Datos de Entrada</b>			
Corriente falta $I_F$ :		10,000	kA
Split factor $S_f$ :		0,80516	
Tipo de Resistencia de PAT		1	Combinación de mallas y picas
Resistencia puesta a tierra $R_{pat}$ :		1,146643321	$\Omega$
<b>2.- Cálculo de <math>D_f</math></b>			
Factor de reducción $D_f$ :		1,031340	
<b>3.- Cálculo Corriente <math>I_G</math></b>			
Considerar factor $D_f$ :		1	Si
Considerar factor $S_f$ :		1	Si
Corriente $I_G$ :		8,3039	kA
<b>4.- Cálculo Ground Potential Rise GPR</b>			
GPR:		9521,653083	V

Ilustración 39

¿GPR =	9521,65	<	Etouch=	159,75	?	→	2 NO	→	CALCULAR Em Y Es
--------	---------	---	---------	--------	---	---	------	---	------------------

Ilustración 40

## 7.2.7 Tensión Máxima de Contacto y de Paso en el Interior de la Malla

En este paso se calcularán las tensiones máximas de contacto y de paso en el diseño de Puesta a Tierra.



Se considerará que las picas están a lo largo del perímetro de la malla.

<b>1.-Datos Generales</b>			
Resistividad del terreno $\rho$ :		72,897	$\Omega \cdot m$
Diseño inicial puesta a tierra:	2	Rectangular	
Distancia entre conductores $D$ :		26,00	m
Diámetro del conductor $d$ :		0,010998	m
Profundidad cable enterrado $h$ :		1,000	m
Factor geométrico $n$ :		3,79925437	
Tipo de mallado:	4	Picas en el perímetro	
Factor $K_{ii}$ :		1,000	
Factor $K_h$ :		1,414	
Factor $K_m$ :		1,219	
Factor geométrico $K_i$ :		1,20628965	
Factor geométrico $K_s$ :		0,180	
Corriente de falta $I_G$ :		8303,93629	A
Longitud total efectiva $L_M$ :		266,35	m
Longitud total conductores $L_c$ :		218,00	m
Longitud picas total $L_R$ :		30,00	m
Longitud efectiva $L_S$ :		189,00	m
Tensión de malla $E_m$ :		3342,38	V
Tensión de paso $E_s$ :		694,16	V

Ilustración 41

## 7.2.8 Validación

En este paso se comprueba si las tensiones de paso máximas de contacto y de paso que puedan existir en la instalación son menores que las que la normativa permite.

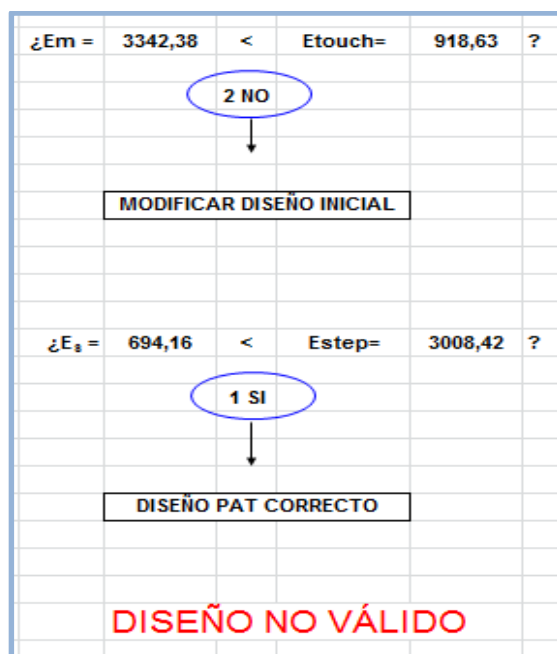


Ilustración 42

Se comprueba que la tensión de paso si cumple con el límite establecido, mientras que la de contacto no. Como es necesario que se cumplan las dos condiciones, el diseño que se ha realizado no es válido y por tanto habrá que modificarlo.

## 7.3 Cálculos con ETAP

A continuación se hace un resumen de los pasos realizados con el programa ETAP para el caso de la malla rectangular. Para ello, se han utilizado los mismos datos de entrada que en la Hoja de Cálculo.

En primer lugar se define el tipo de terreno: modelo uniforme (clean limestone) con una resistividad de  $72,897\Omega\cdot m$  y una capa superficial de  $3000\Omega\cdot m$  dispuesta a una profundidad de la superficie de 0,1 metros.

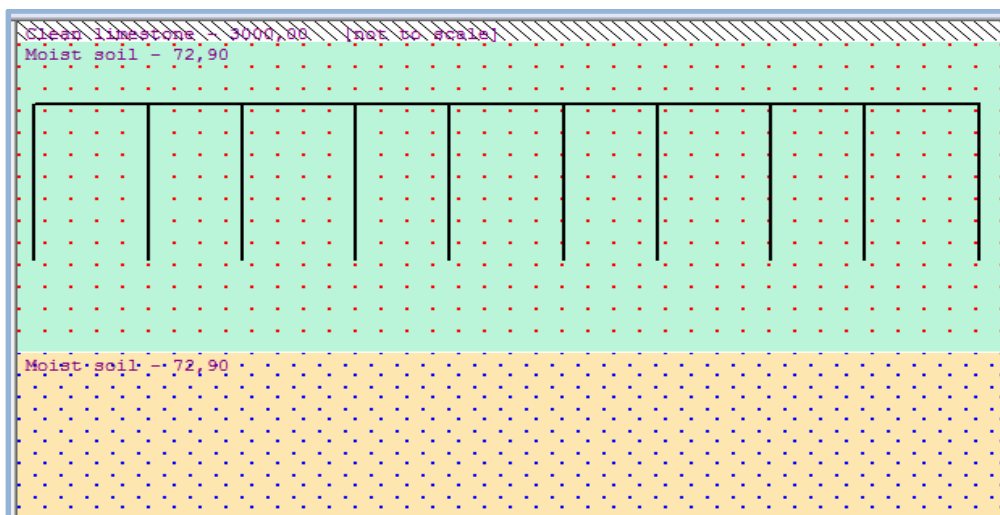
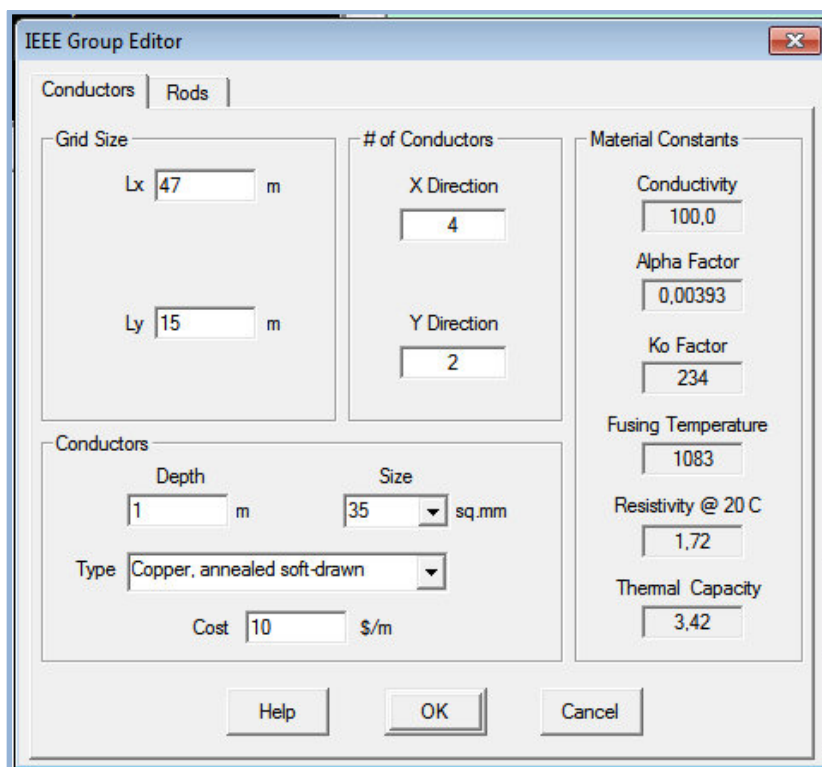


Ilustración 43

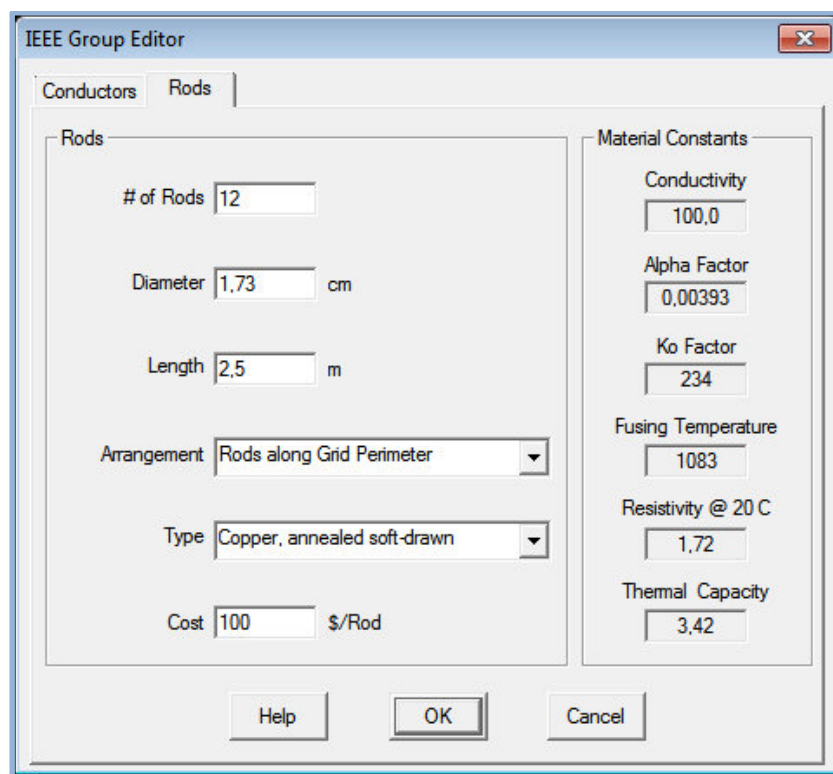
A continuación, se define la malla que se ha dimensionado para la subestación. Una malla rectangular de 47 x 15 metros con 12 picas a lo largo del perímetro.

Como la Hoja de Cálculo facilita la sección mínima normalizada del conductor capaz de soportar las condiciones de corriente de falta en las que se encuentra, basta con introducir este valor y el tipo de cable en el ETAP.



The screenshot shows the 'IEEE Group Editor' dialog box with the 'Conductors' tab selected. The 'Grid Size' section has 'Lx' set to 47 m and 'Ly' set to 15 m. The '# of Conductors' section has 'X Direction' set to 4 and 'Y Direction' set to 2. The 'Material Constants' section on the right lists: Conductivity (100.0), Alpha Factor (0.00393), Ko Factor (234), Fusing Temperature (1083), Resistivity @ 20 C (1.72), and Thermal Capacity (3.42). The 'Conductors' section at the bottom has 'Depth' set to 1 m, 'Size' set to 35 sq.mm, 'Type' set to 'Copper, annealed soft-drawn', and 'Cost' set to 10 \$/m. At the bottom are 'Help', 'OK', and 'Cancel' buttons.

Ilustración 44



The screenshot shows the 'IEEE Group Editor' dialog box with the 'Rods' tab selected. The 'Rods' section has '# of Rods' set to 12, 'Diameter' set to 1.73 cm, 'Length' set to 2.5 m, 'Arrangement' set to 'Rods along Grid Perimeter', 'Type' set to 'Copper, annealed soft-drawn', and 'Cost' set to 100 \$/Rod. The 'Material Constants' section on the right is identical to the previous screenshot. At the bottom are 'Help', 'OK', and 'Cancel' buttons.

Ilustración 45

Después se dibuja la malla que se ha estudiado en la Hoja de Cálculo. Se adjuntan dos fotografías para ver la malla desde diferentes puntos de vista.

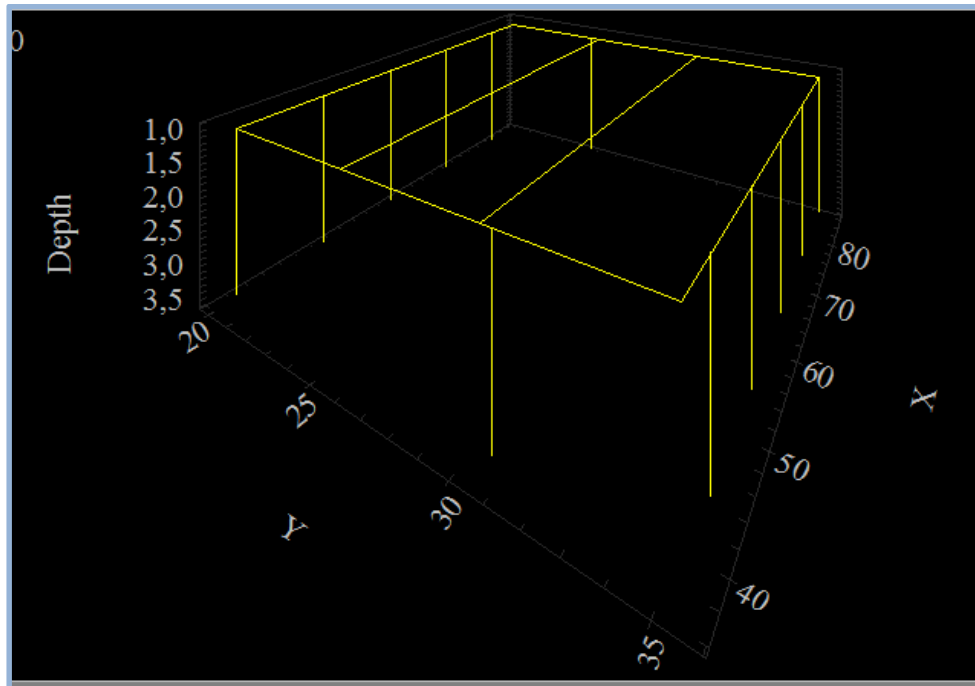


Ilustración 46

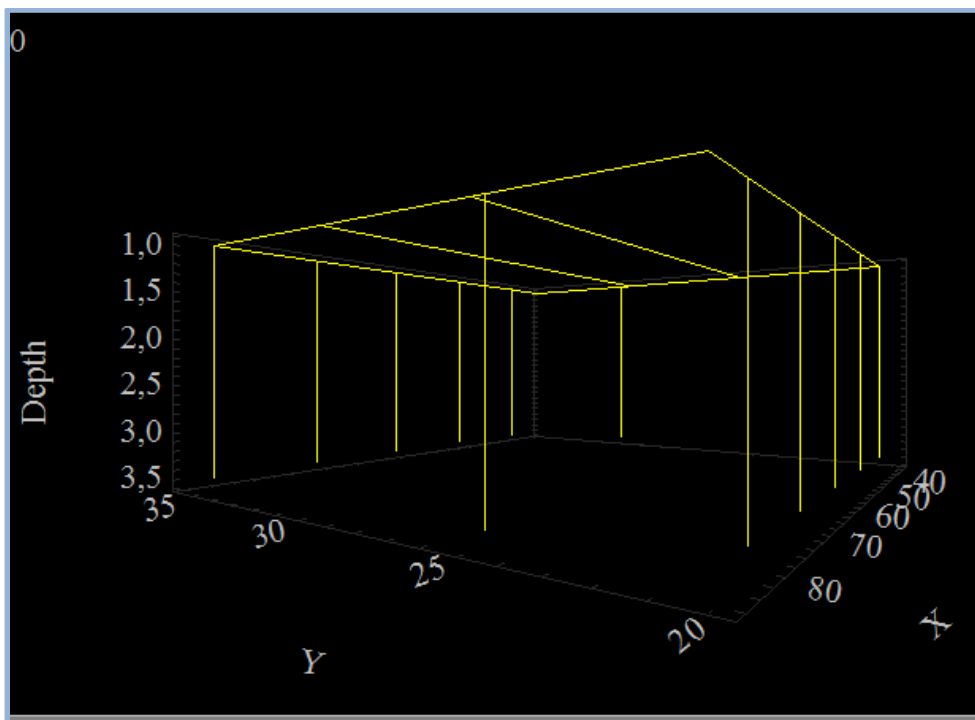


Ilustración 47

Antes de ver los resultados obtenidos por el programa, es necesario definir los siguientes parámetros: peso de la persona (70 kg), temperatura ambiente (40 °C), tiempo de falta, corriente de falta y el parámetro X/R. Se podría poner el valor del Split factor o

aplicarlo directamente sobre el valor de la corriente, se ha optado por lo segundo. De las dos maneras, el resultado no varía.

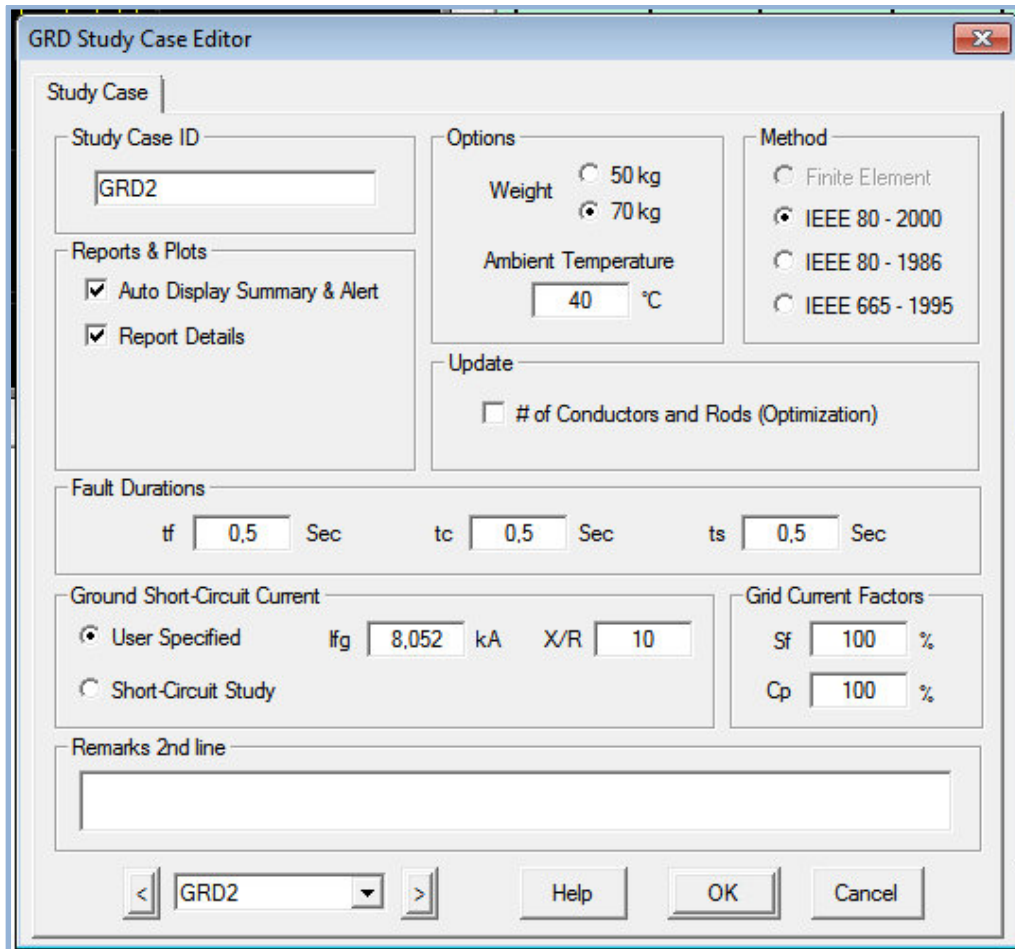


Ilustración 48

### 7.3.1 Resultados ETAP

Pulsando en el botón de ejecución, el programa calculará directamente los valores de la tensión de contacto y de paso de la instalación y aparecerá una señal de alerta en el caso de que dichos valores se excedan de los permitidos.

Result Summary			
	Calculated Volts	Tolerable Volts	
Touch	3560,4	918,6	
Step	694,2	3008,4	
GPR	11902,2	Volts	Rg 1,433 Ohm

**Ilustración 49**

La tensión de contacto no cumple las especificaciones. La solución óptima que el ETAP proporciona para que se cumpla con el objetivo es la siguiente: 6 conductores en el eje X, 19 en el eje Y y por último, 36 picas de 3 metros de longitud a lo largo del perímetro.

Optimal Number of Conductors in	
X direction	Y direction
6	19

**Ilustración 50**

## 7.4 Comparativa de Resultados

Se comprueba así, que los resultados obtenidos por los dos métodos son prácticamente iguales.

Variable	Hoja de Cálculo	ETAP
Tensión de contacto admisible	918,63 V	918,6 V
Tensión de paso admisible	3008,42 V	3008,4 V
Resistencia de PAT	1,1466 $\Omega$	1,433 $\Omega$
Tensión máxima de contacto	3342,38 V	3560,4 V
Tensión de paso en la malla	694,16 V	694,2 V
GPR	11406,58 V	11902,2 V

**Tabla 10. Comparativa de resultados**

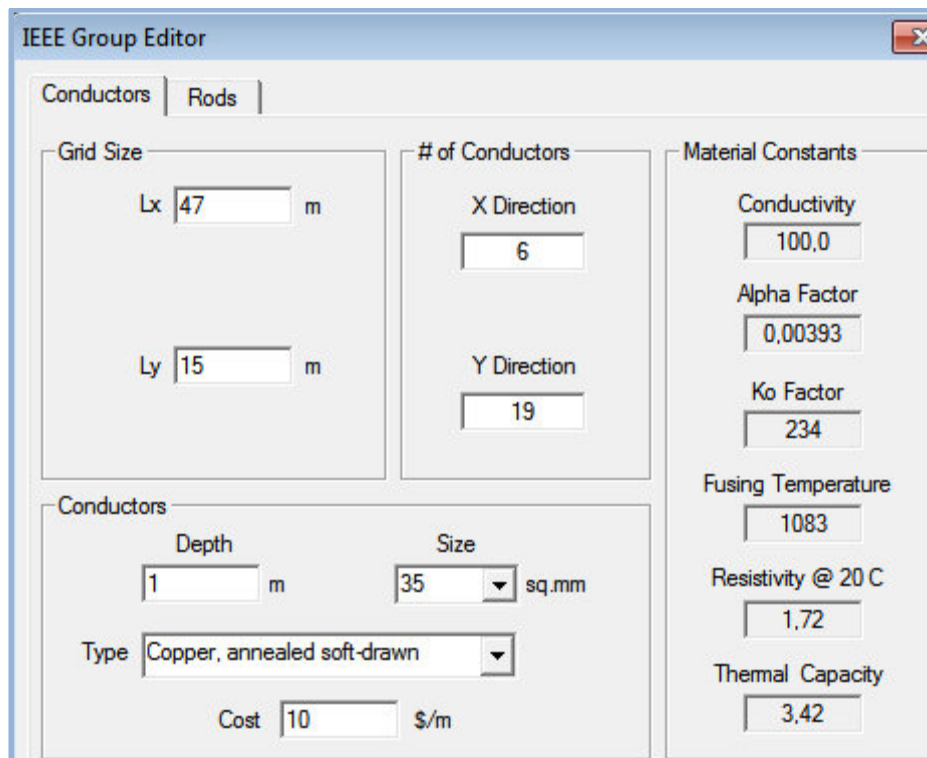
## 7.5 Modificación del Diseño Inicial

Al no cumplir con los valores establecidos de tensión, habrá que realizar un nuevo diseño de la malla. Una forma de solucionarlo, es ir tanteando el número de conductores en la Hoja de Cálculo e ir probando hasta que se cumpla con lo requerido. Otra manera, es igualar la tensión de contacto de la instalación a la tensión de contacto admisible por una persona de 70 kg (en este caso). Dejando el resto de parámetros invariantes, la única incógnita será el número de conductores que hay por eje.

Como el programa ETAP nos da la solución óptima en caso de error, como ya hemos visto, la utilizaremos para meter estos datos en la Hoja de Cálculo y en el propio ETAP para conseguir la solución óptima.

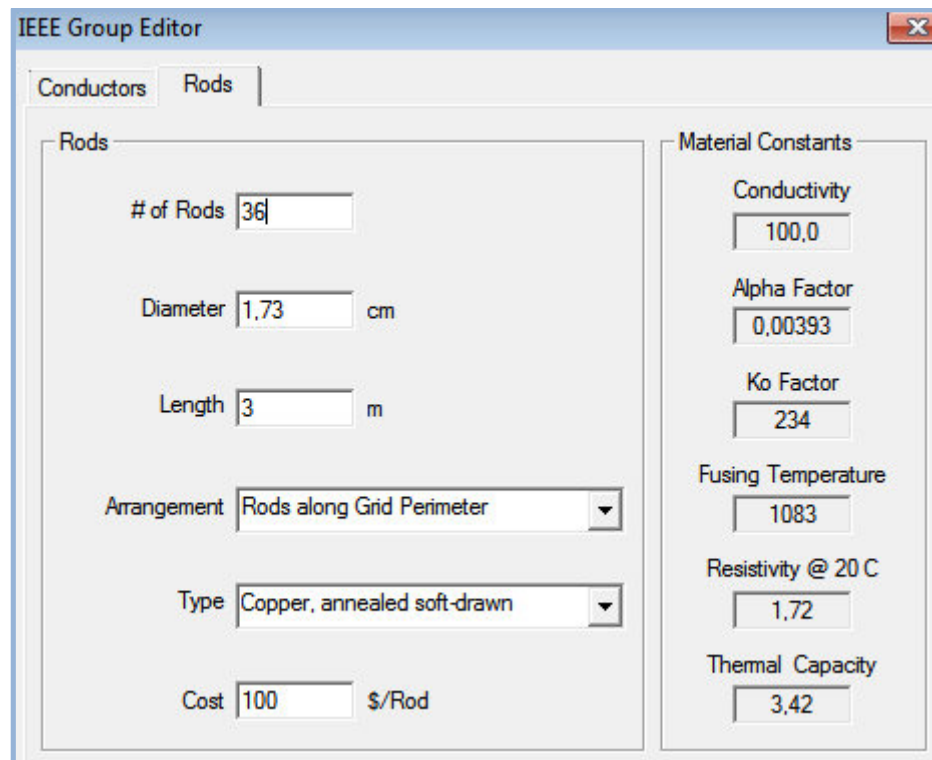
### 7.5.1 Modificación con ETAP

Dentro del diseño que teníamos, solo tenemos que modificar el número de conductores, el número de picas y la longitud de estas últimas:



Parameter	Value	Unit
Grid Size Lx	47	m
Grid Size Ly	15	m
# of Conductors X Direction	6	
# of Conductors Y Direction	19	
Material Constants Conductivity	100.0	
Material Constants Alpha Factor	0.00393	
Material Constants Ko Factor	234	
Material Constants Fusing Temperature	1083	
Material Constants Resistivity @ 20 C	1.72	
Material Constants Thermal Capacity	3.42	
Conductor Depth	1	m
Conductor Size	35	sq.mm
Conductor Type	Copper, annealed soft-drawn	
Conductor Cost	10	\$/m

Ilustración 51



IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Rods

# of Rods 36

Diameter 1.73 cm

Length 3 m

Arrangement Rods along Grid Perimeter

Type Copper, annealed soft-drawn

Cost 100 \$/Rod

Material Constants

Conductivity 100.0

Alpha Factor 0.00393

Ko Factor 234

Fusing Temperature 1083

Resistivity @ 20 C 1.72

Thermal Capacity 3.42

Ilustración 52

La nueva malla que obtenemos es:

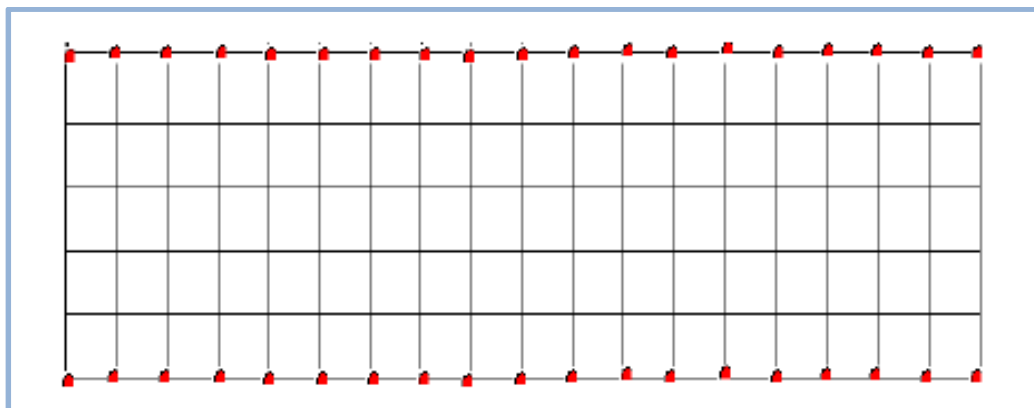


Ilustración 53



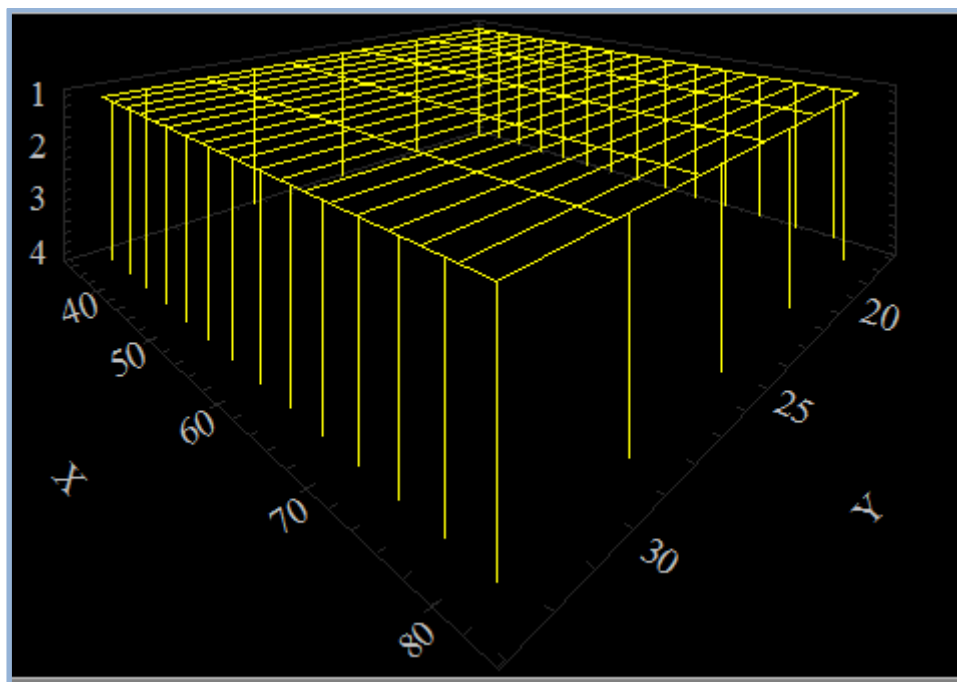


Ilustración 54

Los resultados que obtenemos con ETAP con el nuevo dimensionamiento son los que se muestran a continuación:

Summary and Alert			
Result Summary			
	Calculated Volts	Tolerable Volts	
Touch	912,8	918,6	
Step	877,4	3008,4	
GPR	10358,1	Volts	
		Rg	1,247 Ohm

Ilustración 55

## 7.5.2 Modificación con la Hoja de Cálculo

Al igual que con ETAP, a la hora de modificar nuestro diseño, solo tendremos que variar el número de conductores, el número de picas y la longitud de estas últimas.

<b>2.-Diseño Rectangular:</b>			
Longitud del lado de la malla Lx:		47	m
Longitud del lado de la malla Ly:		15	m
Área total A:		705	m <sup>2</sup>
Número de conductores en x:		6	
Espacio entre conductores Dy:		3	m
Número de conductores en y:		19	
Espacio entre conductores Dx:		2,6111111	m
Espacio medio entre conductores D:		2,8055556	m
Perímetro Lp:		124	m
Longitud total conductores Lc:		567	m
Distancia máxima entre dos puntos Dm:		49,335586	m
Factor geométrico na:		9,1451613	
Factor geométrico nb:		1,0805219	
Factor geométrico nc:		1	
Factor geométrico nd:		1	
Factor geométrico n:		9,8815469	
Factor corrección geométrico Ki:		2,1064689	
Número de picas n <sub>R</sub> :		36	
Longitud pica L <sub>r</sub> :		3	m
Longitud picas total L <sub>R</sub> :		108	m
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :		742,41207	m
Diámetro pica 2b:		0,0173	m

Ilustración 56

Al variar el dimensionamiento, cambiará el valor de la resistencia de Puesta a Tierra

<b>1.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Conductores Enterrados</b>			
Resistividad del terreno:		72,897	$\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2	Rectangular	
Longitud total de los conductores $L_c$ :		567	m
Profundidad de enterrado conductor $h$ :		1	m
Diámetro del conductor $d$ :		0,010998	m
Radio efectivo conductor $a'$ :		0,105	m
Área total del mallado $A$ :		705	$m^2$
1) Curvas de Schwarz			
Tipo de Curva:	1	CURVA A	
Coefficiente $k_1$ :		1,284666667	
Coefficiente $k_2$ :		5,97	
2) Kercel			
Coefficiente Kercel $k_1$ :		1,266812057	
Coefficiente Kercel $k_2$ :		7,956012103	
Método de cálculo:		Kercel	
$k_1$ :		1,266812057	
$k_2$ :		7,956012103	
Resistencia PAT conductor $R_1$ :		1,161607627	$\Omega$
<b>2.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Picas</b>			
Resistividad del terreno:		72,897	$\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2	Rectangular	
Longitud de cada pica $L_r$ :		3	m
Diámetro pica $2b$ :		0,0173	m
Número de picas $n_R$ :		36	
Longitud total picas $L_R$ :		108	m
Resistencia PAT picas $R_2$ :		30,19891242	$\Omega$
<b>3.- Cálculo Resistencia Mutua Puesta a Tierra</b>			
Resistencia PAT mutua $R_m$ :		1,065287842	$\Omega$
<b>4.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra</b>			
Resistencia PAT $R_g$ :		1,16129	$\Omega$

Ilustración 57

¿GPR = 9643,28	<	Etouch= 159,75	?	→	2 NO	→	CALCULAR Em Y Es
----------------	---	----------------	---	---	------	---	------------------

Ilustración 58

El diseño en este caso es el óptimo, ya que tiene el número mínimo de conductores que pueden cumplir con las tensiones admisibles de paso y de contacto.

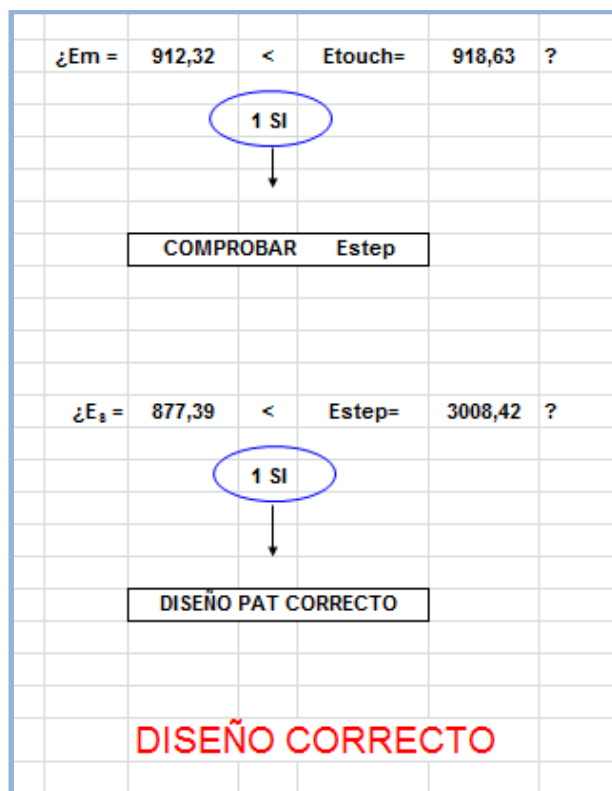


Ilustración 59

### 7.5.3 Comparativa de resultados

Variable	Hoja de Cálculo	ETAP
Tensión de contacto admisible	918,63 V	918,6 V
Tensión de paso admisible	3008,42 V	3008,4 V
Resistencia de PAT	1,1613 $\Omega$	1,247 $\Omega$
Tensión máxima de contacto	912,32 V	912,8 V
Tensión de paso en la malla	877,39 V	877,4 V
GPR	9643,28 V	10358,1 V

Tabla 11. Comparativa de resultados optimizados

La mayor diferencia existente es la de la resistencia de Puesta a Tierra. Tras varias comprobaciones, se ha llegado a la conclusión que la causa de esta desviación es el método de cálculo aplicado.

La Hoja de Cálculo utiliza las ecuaciones de Schwarz, mientras que el ETAP utiliza la siguiente expresión:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Sustituyendo en la fórmula con los datos de diseño, obtenemos el mismo valor que el ETAP para la Resistencia de Puesta a Tierra.

La Norma permite la utilización de los dos métodos. Sin embargo, las ecuaciones de Schwartz realizan un cálculo más complicado pero más exacto que el usado por el ETAP. Por ello siempre se recomienda al usuario la utilización de dicho método en la Hoja de Cálculo.

Esta diferencia afecta al cálculo del GPR (es mayor cuanto mayor sea la resistencia de puesta a tierra).

Por otra parte, existen parámetros en los que el hombre puede actuar. Éstos son, básicamente, factores en el diseño de la instalación de Puesta a Tierra: Split factor, profundidad a la que están enterrados los conductores y el dimensionamiento de las picas (longitud de la pica y número de picas en la malla).

El Split Factor es de los parámetros que resulta más complicado modificarlo. Lo que se pretende es conducir la corriente de falta por otros caminos que no sean la malla de tierra. Esto se puede conseguir modificando el hilo de guarda o el aumento del número de líneas de distribución y de alimentación que hay en la zona.

La profundidad a la que están enterrados los conductores es un parámetro sobre el que se puede actuar con bastante facilidad. Siempre teniendo en cuenta que la Norma y en consecuencia la Hoja de Cálculo, sólo es válida para profundidades de conductor enterrado entre los 0.4 y 2.5 metros.

El diseño de las picas depende del catálogo del fabricante. Los parámetros importantes para seleccionar una pica son el diámetro y la longitud.

## 8. Conclusiones

---

El sistema de Puesta a Tierra debe ser diseñado teniendo en cuenta las exigencias de seguridad, basadas principalmente en los reglamentos y normas establecidos al respecto.

Existen múltiples métodos para cumplir con un correcto diseño de una Puesta a Tierra. En este proyecto se ha desarrollado una Hoja de Cálculo basada en la Norma IEEE Std 80-2000 “Guide for Safety in AC Substation Grounding”.

La elección del método que explica la Norma Internacional se debe a que es la práctica más utilizada para el diseño de sistemas de Puesta a Tierra. Por lo cual, se recomienda el uso de esta metodología de diseño, por encima de cualquier otro método de cálculo, debido a que es un método sencillo, rápido y no requiere extensos recursos computacionales, obteniendo resultados efectivos y que han sido extensamente puestos a prueba.

La Hoja de Cálculo descrita en el proyecto, se puede tomar como un complemento que se ajusta fielmente a la Normativa y que calcula de forma sencilla y rápida el diseño de una Puesta a Tierra en subestaciones y sistemas eléctricos. A través de un interfaz sencillo, mediante Excel, se ha conseguido que la utilización de dicha herramienta sea muy intuitiva y directa, de modo que introduciendo las variables solicitadas por la aplicación se obtienen resultados fiables de manera automática.

Todos estos resultados se han demostrado de forma satisfactoria a lo largo de este proyecto a través del programa ETAP, una herramienta computacional compleja.

Se concluye por tanto que la Hoja de Cálculo creada en este proyecto es totalmente válida de cara a su uso en las fases iniciales de diseño de un proyecto de ingeniería en que se desee calcular la Puesta a Tierra de una subestación eléctrica y cumplir con la Normativa vigente.

## 9. Bibliografía

---

- **IEEE 80-2000:** IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- **UNE-EN 60-909-0:** Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna
- **UNE-EN 60-909-3**
- **Cuaderno Técnico Schneider nº 158:** Cálculo de corrientes de cortocircuito
- **Cuaderno Técnico Schneider PT-009:** Medidas y Vigilancia de las Instalaciones de Puesta a Tierra
- **Reglamento sobre centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación:** MIE-RAT capítulo 13
- **UNE 20-572-92- 1:** Efecto de la Corriente Eléctrica al pasar por el Cuerpo Humano. Aspectos Generales.
- **Prevención de riesgos laborales en Foster Wheeler Iberia**

## 10. Anexos

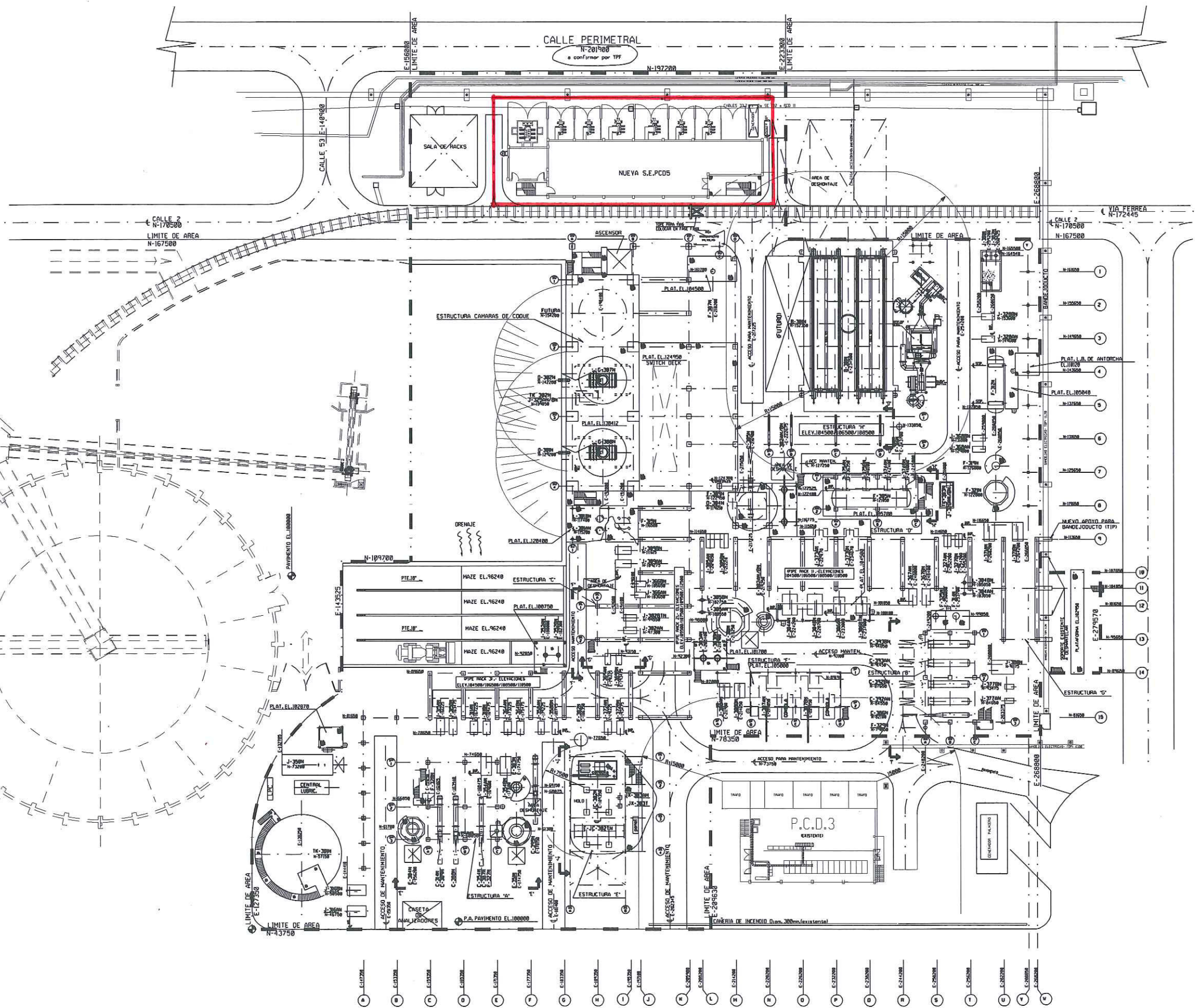
---

### 10.1 Anexo 1

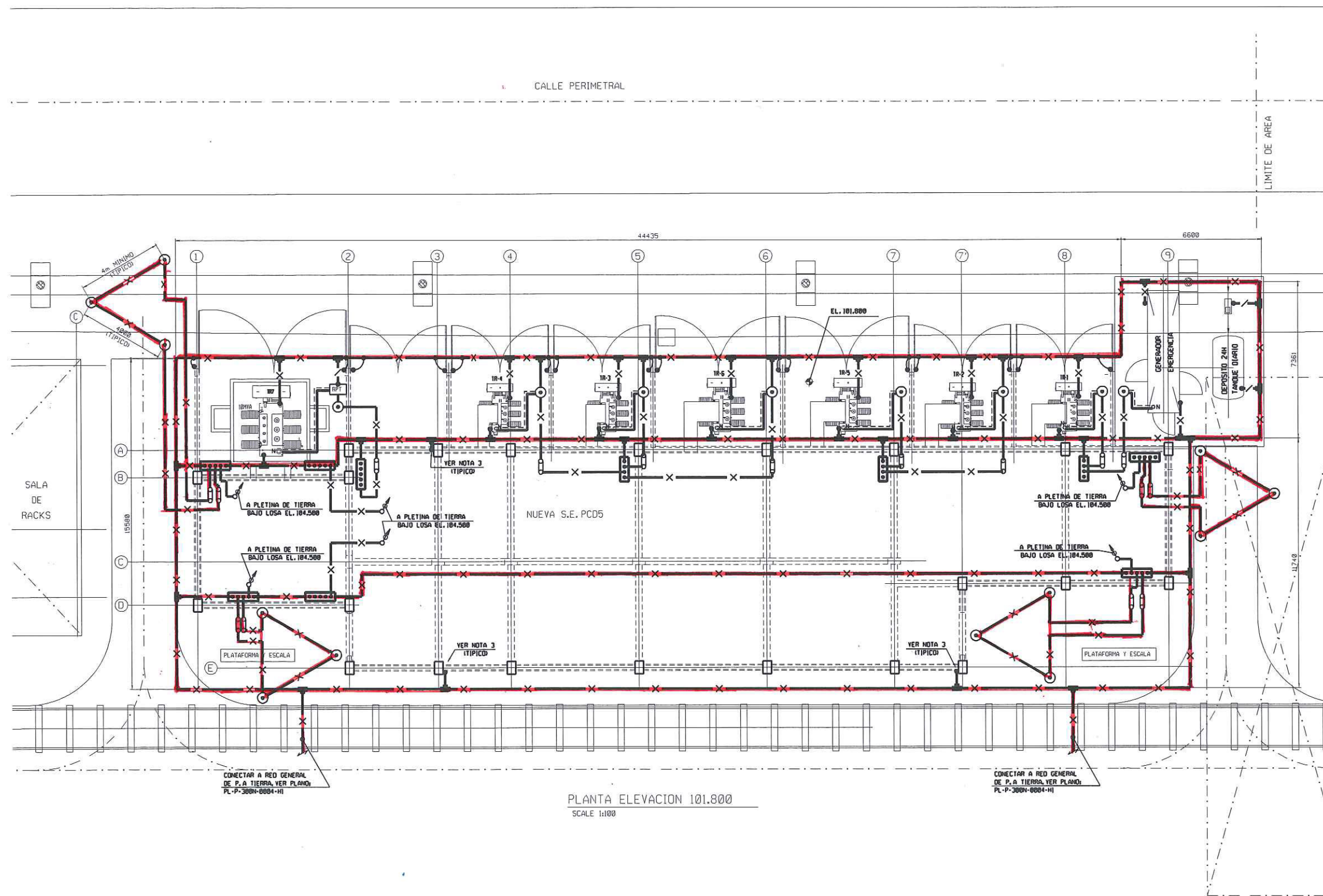
El plano uno corresponde a la central y a su subestación adyacente. La marca roja indica la superficie de estudio (la subestación).

El plano dos, muestra únicamente la subestación. En ella, se puede ver, la disposición de los cables de tierra y de las picas.











## 10.2 Anexo 2

A continuación se anexan todos los cálculos realizados con la Hoja de Cálculo, tanto el modelo inicial (no válido) como el modelo optimizado (válido).

## **DATOS DE DISEÑO**

### **1.-Datos (típicos) para el diseño de la Puesta a Tierra**

Tiempo de falta $t_s$ :	0,5 s
Tensión de red $U_n$	132 KV
Intensidad máxima de corriente de defecto a tierra $I_f$	10 KA
Split factor $S_f$ :	0,80516
Resistividad capa superficial $\rho_s$ :	3000 $\Omega \cdot m$
Profundidad de la capa superficial $h_s$ :	0,1 m
Profundidad a la que están enterrados los conductores $h$	1 m
(*)Máxima longitud de la malla en la dirección x $L_x$	m
(*)Máxima longitud de la malla en la dirección y $L_y$	m
(*)Número de picas $n_R$	
Relación X/R	10
Frecuencia de red	50 Hz

(\*) Si no lo dan como dato de diseño, acudir a los planos

# CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

## 1.- Modelo de resistividad uniforme

Valores medidos de resistividad:

Distancia entre electrodos: insertar valores en Tabla 1

Número de medidas:

7

Resistividad aparente 1:

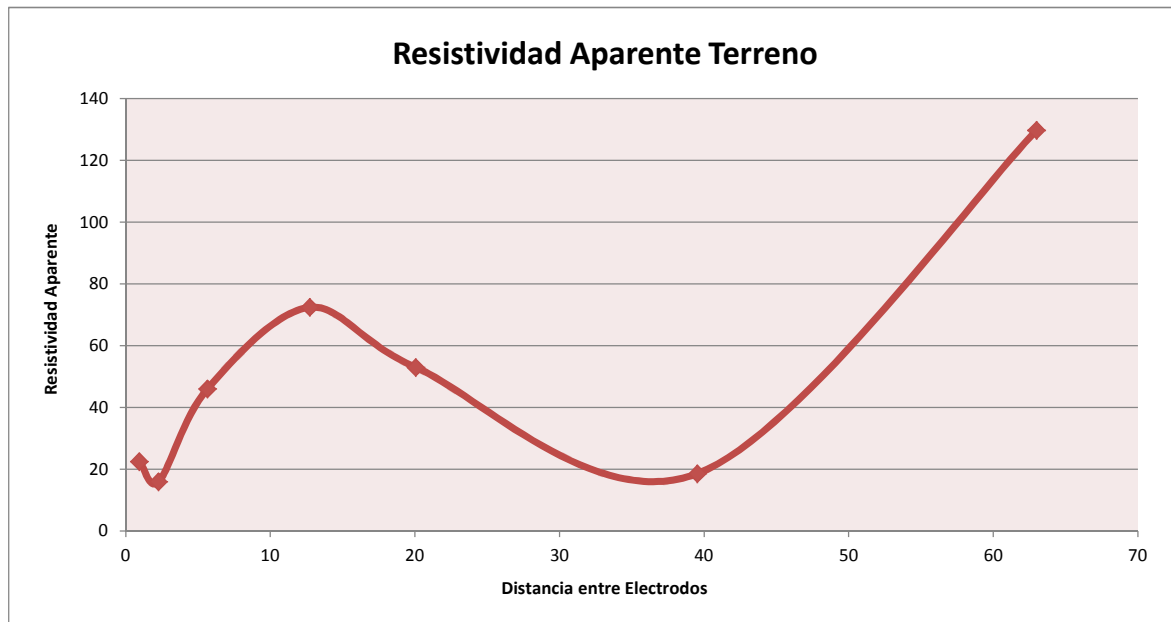
51,213286  $\Omega \cdot m$

Resistividad aparente 2:

72,897  $\Omega \cdot m$

Resistividad aparente  $\rho_a$ :

**72,897  $\Omega \cdot m$**



## 2.- Modelo suelo de dos capas

Valores medidos de resistividad:

Distancia entre electrodos: insertar valores en Tabla 1

Resistividad aparente  $\rho_a$ :

**39,313024  $\Omega \cdot m$**

Distancia entre electrodos para resistividad aparente a:

28,911111 m

Resistividad capa superior  $\rho_1$ :

**26,45005  $\Omega \cdot m$**

Resistividad capa inferior  $\rho_2$ :

**108,63705  $\Omega \cdot m$**

Relación  $\rho_2 / \rho_1$ :

4,1072531

Relación  $\rho_a / \rho_1$ :

1,4863119

Relación  $a/h$  (Gráfico de Sunde):

**1,5**

Profundidad primera capa  $h$  (Gráfico de Sunde):

19,274074 m

Coefficiente reflexión  $K$ :

0,6084001

### **Nota:**

Si en el modelo de suelo de dos capas se obtiene un coeficiente de reflexión negativo, es recomendable utilizar el modelo de resistividad uniforme ya que es más desfavorable.

# CÁLCULO DE LA SECCIÓN CONDUCTOR

## 1.-Datos Generales

Descripción cable :	100 Copper, annealed soft-drawn
Temperatura ambiente :	40 °C
Intensidad de falta (valor eficaz):	10 kA
Tiempo de la falta:	0,5 s
Conductividad del material:	100 %
Coeficiente de resistividad térmico a 20°C:	0,00393 °C <sup>-1</sup>
K <sub>0</sub> :	234 °C
Temperatura de fusión:	1083 °C
Resistividad pr a 20°C	1,72 μΩ·cm
Capacidad térmica TCAP:	3,42 J/(cm <sup>3</sup> ·°C)
Sección mínima:	25,0891 mm <sup>2</sup>
<b>Sección mínima normalizada:</b>	<b>35 mm<sup>2</sup></b>

## 2.- DC Offset de la Corriente

Considerar:	Si
Frecuencia de red:	50 Hz
Tiempo de falta:	0,5 s
Relación X / R:	10
Constante tiempo del DC offset Ta	0,03183 s
Factor de reducción Df:	<b>1,03134</b>
Intensidad corriente asimétrica:	10,3134 kA
Sección mínima:	25,8754 mm <sup>2</sup>
<b>Sección mínima normalizada:</b>	<b>35 mm<sup>2</sup></b>

### **Nota:**

Si el cable seleccionado es hard drawn copper y se requiere por razones mecánicas la resistencia de éste, la temperatura de fusión deberá ser 250 °C

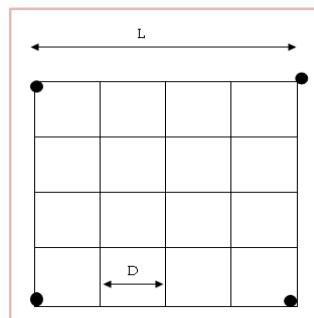
En ese caso:

Sección mínima:	41,6766 mm <sup>2</sup>
Sección mínima normalizada:	50 mm <sup>2</sup>

## DISEÑO INICIAL DE LA PUESTA A TIERRA

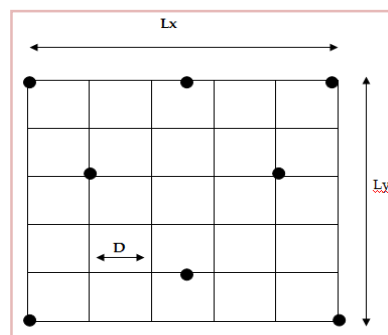
### 1.-Diseño Cuadrado

Longitud del lado de la malla L:	70 m
Área total A:	4900 m <sup>2</sup>
Número de conductores:	24 m
Espacio entre conductores D:	6,3636 m
Perímetro Lp:	280 m
Longitud total conductores Lc:	1680 m
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	98,9949 m
Factor geométrico na:	12
Factor geométrico nb:	1
Factor geométrico nc:	1
Factor geométrico nd:	1
Factor geométrico n:	12
Factor corrección geométrico Ki:	2,4200
Número de picas n <sub>R</sub> :	0
Longitud pica L <sub>r</sub> :	0 m
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	0 m
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	1680,0000 m
Diámetro pica 2b:	0 m



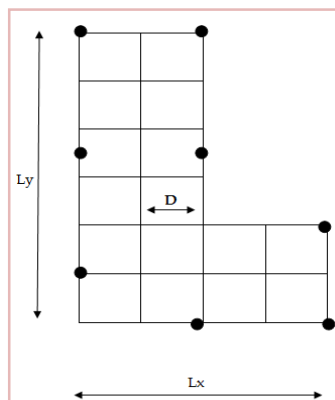
### 2.-Diseño Rectangular:

Longitud del lado de la malla Lx:	47 m
Longitud del lado de la malla Ly:	15 m
Área total A:	705 m <sup>2</sup>
Número de conductores en x:	4
Espacio entre conductores Dy:	5 m
Número de conductores en y:	2
Espacio entre conductores Dx:	47 m
Espacio medio entre conductores D:	26 m
Perímetro Lp:	124 m
Longitud total conductores Lc:	218 m
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	49,335586 m
Factor geométrico na:	3,516129
Factor geométrico nb:	1,0805219
Factor geométrico nc:	1
Factor geométrico nd:	1
Factor geométrico n:	3,7992544
Factor corrección geométrico Ki:	1,2062896
Número de picas n <sub>R</sub> :	12
Longitud pica L <sub>r</sub> :	2,5 m
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	30 m
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	266,35465 m
Diámetro pica 2b:	0,0173 m



### 3.-Diseño en L:

Longitud del lado de la malla Lx:	47 m
Longitud del lado de la malla Ly:	15 m
Área total A:	470 m <sup>2</sup>
Número de conductores en x:	16
Espacio entre conductores Dy:	1 m
Número de conductores en y:	11
Espacio entre conductores Dx:	4,7 m
Espacio medio entre conductores D:	2,85 m
Perímetro Lp:	124 m
Longitud total conductores Lc:	632 m
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	49,335586 m
Factor geométrico na:	10,193548
Factor geométrico nb:	1,195794
Factor geométrico nc:	1,2083032
Factor geométrico nd:	1
Factor geométrico n:	14,728472
Factor corrección geométrico Ki:	2,8238138
Número de picas n <sub>R</sub> :	0
Longitud pica L <sub>r</sub> :	3 m
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	0 m
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	632 m
Diámetro de la pica 2b:	0,0143 m



# **TENSIÓN DE PASO Y CONTACTO ADMISIBLE**

## **1.-Cálculo según IEEE 80-2000**

Peso de la persona:	70 kg
Resistividad capa superficial $\rho_s$ :	3000 $\Omega \cdot m$
Resistividad del terreno $\rho$ :	72,897 $\Omega \cdot m$
Profundidad de la capa superficial $h_s$ :	0,1 m
Factor reductor de la capacidad normal $C_s$ :	0,697196241
Tiempo de descarga $t_s$ :	0,5 s
Corriente de descarga máxima admisible (Dalziel's):	222,03153 mA
Corriente de descarga máxima admisible (Curva Z):	431,25 mA
Corriente de descarga máxima admisible:	222,03153 mA
Tensión metal-metal $E_{mm}$ :	222,03153 V
<b>Tensión de contacto admisible:</b>	<b>918,62949 V</b>
<b>Tensión de paso admisible:</b>	<b>3008,42339 V</b>

## **2.- Cálculo según MIE-RAT 13**

Tensión de contacto:	159,745752 V
----------------------	--------------

### **Nota:**

Si el tiempo de falta está entre 3-5 segundos, la tensión máxima de contacto será de 64V

Si el tiempo de falta es superior a 5 segundos, la tensión de contacto no será superior a 50 V

Tensión de paso:	2069,83008 V
------------------	--------------

## **3.- Elección Normativa**

Norma a aplicar:	IEEE 80-2000
<b>Tensión de contacto admisible <math>E_{touch}</math>:</b>	<b>918,62949 V</b>
<b>Tensión de paso admisible <math>E_{step}</math>:</b>	<b>3008,42339 V</b>



## **CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

### **COMBINACIÓN DE MALLA Y PICAS**

#### **1.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Conductores Enterrados**

Resistividad del terreno:		72,897 $\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2	Rectangular
Longitud total de los conductores $L_c$ :		218 m
Profundidad de enterrado conductor $h$ :		1 m
Diámetro del conductor $d$ :		0,010998 m
Radio efectivo conductor $a'$ :		0,105 m
Área total del mallado $A$ :		705 m <sup>2</sup>
1) Curvas de Schwarz		
Tipo de Curva:	1	CURVA A
Coeficiente $k_1$ :		1,284666667
Coeficiente $k_2$ :		5,97
2) Kercel		
Coeficiente Kercel $k_1$ :		1,266812057
Coeficiente Kercel $k_2$ :		7,956012103
Método de cálculo:		Kercel
$k_1$ :		1,266812057
$k_2$ :		7,956012103
Resistencia PAT conductor $R_1$ :		1,147166534 $\Omega$

#### **2.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Picas**

Resistividad del terreno:		72,897 $\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2	Rectangular
Longitud de cada pica $L_r$ :		2,5 m
Diámetro pica $2b$ :		0,0173 m
Número de picas $n_R$ :		12
Longitud total picas $L_R$ :		30 m
Resistencia PAT picas $R_2$ :		102,7722459 $\Omega$

#### **3.- Cálculo Resistencia Mutua Puesta a Tierra**

Resistencia PAT mutua $R_m$ :	0,916052961 $\Omega$
-------------------------------	----------------------

#### **4.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra**

Resistencia PAT $R_g$ :	1,14664 $\Omega$
-------------------------	------------------

### **SÓLO MALLA (sin picas)**

Diseño inicial Puesta a Tierra:	2	Rectangular
Área total $A$ :		705 m <sup>2</sup>
Resistividad del terreno $\rho$ :		72,897 $\Omega \cdot m$
Profundidad de enterrado conductor $h$ :		1 m
Longitud total de los conductores $L_c$ :		218 m
Resistencia de PAT malla $R_g$ :		1,473702 $\Omega$

## CALCULO DE LA INTENSIDAD DE PUESTA A TIERRA

### 1.- Datos de Entrada

Corriente falta  $I_F$ : 10,000 kA  
Split factor  $S_f$ : 0,80516  
Tipo de Resistencia de PAT 1 [Combinación de mallas y picas](#)  
Resistencia puesta a tierra  $R_{pat}$ : 1,146643321  $\Omega$

### 2.- Cálculo de Df

Factor de reducción  $D_f$ : 1,031340

### 3.- Cálculo Corriente $I_G$

Considerar factor  $D_f$ : 1 Si  
Considerar factor  $S_f$ : 1 Si  
Corriente  $I_G$ : 8,3039 kA

### 4.- Cálculo Ground Potential Rise GPR

GPR: 9521,653083 V

¿GPR = 9521,65 < Etouch= 159,75 ?

2 NO

CALCULAR Em Y Es

# CALCULO DE LA TENSION DE MALLA Y DE PASO

## 1.-Datos Generales

Resistividad del terreno $\rho$ :	72,897 $\Omega \cdot m$
Diseño inicial puesta a tierra:	2 Rectangular
Distancia entre conductores D:	26,00 m
Diámetro del conductor d:	0,010998 m
Profundidad cable enterrado h:	1,000 m
Factor geométrico n:	3,79925437
Tipo de mallado:	4 Picas en el perimetro
Factor Kii:	1,000
Factor Kh:	1,414
Factor Km:	1,219
Factor geométrico Ki:	1,20628965
Factor geométrico Ks:	0,180
Corriente de falta $I_G$ :	8303,93629 A
Longitud total efectiva $L_M$ :	266,35 m
Longitud total conductores $L_c$ :	218,00 m
Longitud picas total $L_R$ :	30,00 m
Longitud efectiva $L_S$ :	189,00 m
<b>Tensión de malla <math>E_m</math>:</b>	<b>3342,38 V</b>
<b>Tensión de paso <math>E_s</math>:</b>	<b>694,16 V</b>

## CÁLCULO DE LA TENSION DE MALLA Y DE PASO

¿ $E_m = 3342,38 < E_{touch} = 918,63$  ?

2 NO



MODIFICAR DISEÑO INICIAL

¿ $E_s = 694,16 < E_{step} = 3008,42$  ?

1 SI



DISEÑO PAT CORRECTO

**DISEÑO NO VÁLIDO**

## **DATOS DE DISEÑO**

### **1.-Datos (típicos) para el diseño de la Puesta a Tierra**

Tiempo de falta $t_s$ :	0,5 s
Tensión de red $U_n$	132 KV
Intensidad máxima de corriente de defecto a tierra $I_F$	10 KA
Split factor $S_f$ :	0,80516
Resistividad capa superficial $\rho_s$ :	3000 $\Omega \cdot m$
Profundidad de la capa superficial $h_s$ :	0,1 m
Profundidad a la que están enterrados los conductores $h$	1 m
(*)Máxima longitud de la malla en la dirección x $L_x$	m
(*)Máxima longitud de la malla en la dirección y $L_y$	m
(*)Número de picas $n_R$	
Relación X/R	10
Frecuencia de red	50 Hz

(\*) Si no lo dan como dato de diseño, acudir a los planos

# CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

## 1.- Modelo de resistividad uniforme

Valores medidos de resistividad:

Distancia entre electrodos: [insertar valores en Tabla 1](#)

Número de medidas:

7

Resistividad aparente 1:

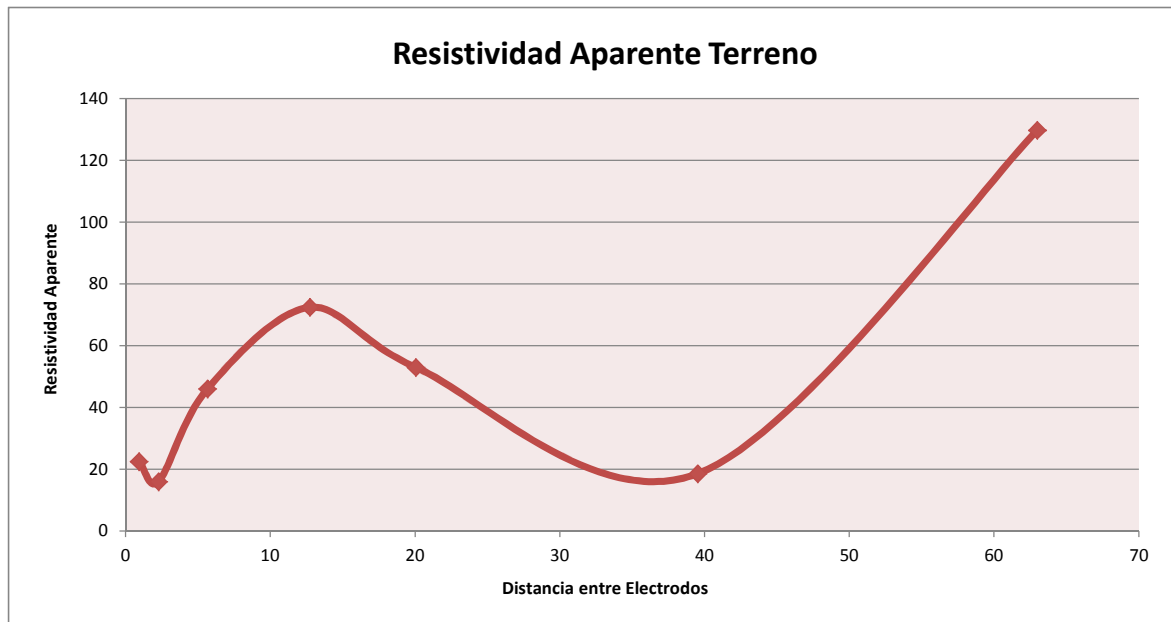
51,213286  $\Omega \cdot m$

Resistividad aparente 2:

72,897  $\Omega \cdot m$

Resistividad aparente  $\rho_a$ :

**72,897  $\Omega \cdot m$**



## 2.- Modelo suelo de dos capas

Valores medidos de resistividad:

Distancia entre electrodos: [insertar valores en Tabla 1](#)

Resistividad aparente  $\rho_a$ :

**39,313024  $\Omega \cdot m$**

Distancia entre electrodos para resistividad aparente a:

28,911111 m

Resistividad capa superior  $\rho_1$ :

**26,45005  $\Omega \cdot m$**

Resistividad capa inferior  $\rho_2$ :

**108,63705  $\Omega \cdot m$**

Relación  $\rho_2 / \rho_1$ :

4,1072531

Relación  $\rho_a / \rho_1$ :

1,4863119

Relación  $a/h$  (Gráfico de Sunde):

**1,5**

Profundidad primera capa  $h$  (Gráfico de Sunde):

19,274074 m

Coefficiente reflexión  $K$ :

0,6084001

### **Nota:**

Si en el modelo de suelo de dos capas se obtiene un coeficiente de reflexión negativo, es recomendable utilizar el modelo de resistividad uniforme ya que es más desfavorable.

# CÁLCULO DE LA SECCIÓN CONDUCTOR

## 1.-Datos Generales

Descripción cable :	100 Copper, annealed soft-drawn
Temperatura ambiente :	40 °C
Intensidad de falta (valor eficaz):	10 kA
Tiempo de la falta:	0,5 s
Conductividad del material:	100 %
Coefficiente de resistividad térmico a 20°C:	0,00393 °C <sup>-1</sup>
K <sub>0</sub> :	234 °C
Temperatura de fusión:	1083 °C
Resistividad pr a 20°C	1,72 μΩ·cm
Capacidad térmica TCAP:	3,42 J/(cm <sup>3</sup> ·°C)
Sección mínima:	25,089089 mm <sup>2</sup>
<b>Sección mínima normalizada:</b>	<b>35 mm<sup>2</sup></b>

## 2.- DC Offset de la Corriente

Considerar:	Si
Frecuencia de red:	50 Hz
Tiempo de falta:	0,5 s
Relación X / R:	10
Constante tiempo del DC offset Ta	0,031831 s
Factor de reducción Df:	<b>1,0313399</b>
Intensidad corriente asimétrica:	10,313399 kA
Sección mínima:	25,875378 mm <sup>2</sup>
<b>Sección mínima normalizada:</b>	<b>35 mm<sup>2</sup></b>

### **Nota:**

Si el cable seleccionado es hard drawn copper y se requiere por razones mecánicas la resistencia de éste, la temperatura de fusión deberá ser 250 °C

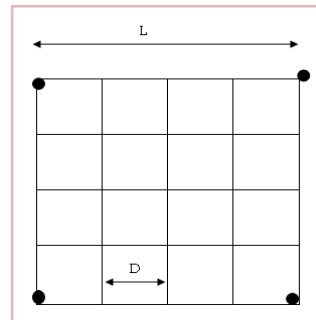
En ese caso:

Sección mínima:	41,67665 mm <sup>2</sup>
Sección mínima normalizada:	50 mm <sup>2</sup>

## DISEÑO INICIAL DE LA PUESTA A TIERRA

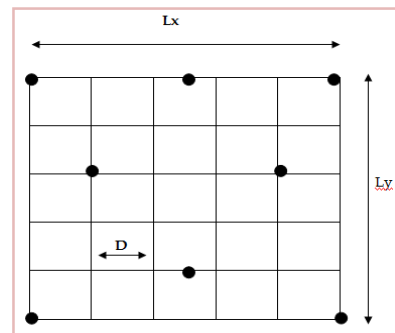
### 1.-Diseño Cuadrado

Longitud del lado de la malla L:	70 m
Área total A:	4900 m <sup>2</sup>
Número de conductores:	24 m
Espacio entre conductores D:	6,3636 m
Perímetro Lp:	280 m
Longitud total conductores Lc:	1680 m
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	98,9949 m
Factor geométrico na:	12
Factor geométrico nb:	1
Factor geométrico nc:	1
Factor geométrico nd:	1
Factor geométrico n:	12
Factor corrección geométrico Ki:	2,4200
Número de picas n <sub>R</sub> :	0
Longitud pica L <sub>r</sub> :	0 m
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	0 m
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	1680,0000 m
Diámetro pica 2b:	0 m



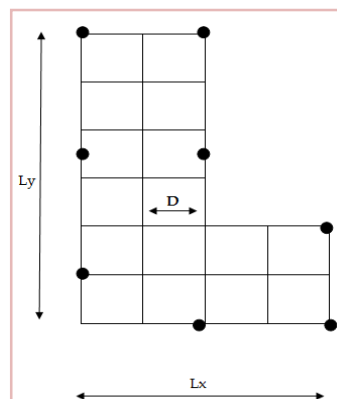
### 2.-Diseño Rectangular:

Longitud del lado de la malla Lx:	47 m
Longitud del lado de la malla Ly:	15 m
Área total A:	705 m <sup>2</sup>
Número de conductores en x:	6
Espacio entre conductores Dy:	3 m
Número de conductores en y:	19
Espacio entre conductores Dx:	2,6111111 m
Espacio medio entre conductores D:	2,8055556 m
Perímetro Lp:	124 m
Longitud total conductores Lc:	567 m
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	49,335586 m
Factor geométrico na:	9,1451613
Factor geométrico nb:	1,0805219
Factor geométrico nc:	1
Factor geométrico nd:	1
Factor geométrico n:	9,8815469
Factor corrección geométrico Ki:	2,1064689
Número de picas n <sub>R</sub> :	36
Longitud pica L <sub>r</sub> :	3 m
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	108 m
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	742,41207 m
Diámetro pica 2b:	0,0173 m



### 3.-Diseño en L:

Longitud del lado de la malla Lx:	47 m
Longitud del lado de la malla Ly:	15 m
Área total A:	470 m <sup>2</sup>
Número de conductores en x:	16
Espacio entre conductores Dy:	1 m
Número de conductores en y:	11
Espacio entre conductores Dx:	4,7 m
Espacio medio entre conductores D:	2,85 m
Perímetro Lp:	124 m
Longitud total conductores Lc:	632 m
Distancia máxima entre dos puntos Dm:	49,335586 m
Factor geométrico na:	10,193548
Factor geométrico nb:	1,195794
Factor geométrico nc:	1,2083032
Factor geométrico nd:	1
Factor geométrico n:	14,728472
Factor corrección geométrico Ki:	2,8238138
Número de picas n <sub>R</sub> :	0
Longitud pica L <sub>r</sub> :	3 m
Longitud picas total L <sub>R</sub> :	0 m
Longitud total efectiva L <sub>M</sub> :	632 m
Diámetro de la pica 2b:	0,0143 m





# CÁLCULO DE LA TENSIÓN DE PASO Y CONTACTO ADMISIBLE

## 1.-Cálculo según IEEE 80-2000

Peso de la persona:	70 kg
Resistividad capa superficial $\rho_s$ :	3000 $\Omega \cdot m$
Resistividad del terreno $\rho$ :	72,897 $\Omega \cdot m$
Profundidad de la capa superficial $h_s$ :	0,1 m
Factor reductor de la capacidad normal $C_s$ :	0,697196241
Tiempo de descarga $t_s$ :	0,5 s
Corriente de descarga máxima admisible (Dalziel's):	222,03153 mA
Corriente de descarga máxima admisible (Curva Z):	431,25 mA
Corriente de descarga máxima admisible:	222,03153 mA
Tensión metal-metal $E_{mm}$ :	222,03153 V
<b>Tensión de contacto admisible:</b>	<b>918,62949 V</b>
<b>Tensión de paso admisible:</b>	<b>3008,42339 V</b>

## 2.- Cálculo según MIE-RAT 13

Tensión de contacto:	159,745752 V
----------------------	--------------

### **Nota:**

Si el tiempo de falta está entre 3-5 segundos, la tensión máxima de contacto será de 64V

Si el tiempo de falta es superior a 5 segundos, la tensión de contacto no será superior a 50 V

Tensión de paso:	2069,83008 V
------------------	--------------

## 3.- Elección Normativa

Norma a aplicar:	IEEE 80-2000
<b>Tensión de contacto admisible <math>E_{touch}</math>:</b>	<b>918,62949 V</b>
<b>Tensión de paso admisible <math>E_{step}</math>:</b>	<b>3008,42339 V</b>

## **CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

### **COMBINACIÓN DE MALLA Y PICAS**

#### **1.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Conductores Enterrados**

Resistividad del terreno:	72,897 $\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2 Rectangular
Longitud total de los conductores $L_c$ :	567 m
Profundidad de enterrado conductor $h$ :	1 m
Diámetro del conductor $d$ :	0,010998 m
Radio efectivo conductor $a'$ :	0,105 m
Área total del mallado $A$ :	705 $m^2$
1) Curvas de Schwarz	
Tipo de Curva:	1 CURVA A
Coeficiente $k_1$ :	1,284666667
Coeficiente $k_2$ :	5,97
2) Kercel	
Coeficiente Kercel $k_1$ :	1,266812057
Coeficiente Kercel $k_2$ :	7,956012103
Método de cálculo:	Kercel
$k_1$ :	1,266812057
$k_2$ :	7,956012103
Resistencia PAT conductor $R_1$ :	1,161607627 $\Omega$

#### **2.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra Picas**

Resistividad del terreno:	72,897 $\Omega \cdot m$
Diseño inicial Puesta a Tierra:	2 Rectangular
Longitud de cada pica $L_r$ :	3 m
Diámetro pica $2b$ :	0,0173 m
Número de picas $n_R$ :	36
Longitud total picas $L_R$ :	108 m
Resistencia PAT picas $R_2$ :	30,19891242 $\Omega$

#### **3.- Cálculo Resistencia Mutua Puesta a Tierra**

Resistencia PAT mutua $R_m$ :	1,065287842 $\Omega$
-------------------------------	----------------------

#### **4.- Cálculo Resistencia Puesta a Tierra**

Resistencia PAT $R_g$ :	1,16129 $\Omega$
-------------------------	------------------

### **SÓLO MALLA (sin picas)**

Diseño inicial Puesta a Tierra:	2 Rectangular
Área total $A$ :	705 $m^2$
Resistividad del terreno $\rho$ :	72,897 $\Omega \cdot m$
Profundidad de enterrado conductor $h$ :	1 m
Longitud total de los conductores $L_c$ :	567 m
Resistencia de PAT malla $R_g$ :	1,267878 $\Omega$

## CALCULO DE LA INTENSIDAD DE PUESTA A TIERRA

### 1.- Datos de Entrada

Corriente falta  $I_F$ : 10,000 kA  
Split factor  $S_f$ : 0,80516  
Tipo de Resistencia de PAT 1 [Combinación de mallas y picas](#)  
Resistencia puesta a tierra  $R_{pat}$ : 1,161290230  $\Omega$

### 2.- Cálculo de Df

Factor de reducción  $D_f$ : 1,031340

### 3.- Cálculo Corriente $I_G$

Considerar factor  $D_f$ : 1 Si  
Considerar factor  $S_f$ : 1 Si  
**Corriente  $I_G$ :** 8,3039 kA

### 4.- Cálculo Ground Potential Rise GPR

GPR: 9643,280088 V

¿GPR = 9643,28 < Etouch= 159,75 ? → 2 NO → CALCULAR Em Y Es

# CÁLCULO DE LA TENSION DE MALLA Y DE PASO

## 1.-Datos Generales

Resistividad del terreno $\rho$ :		72,897 $\Omega \cdot m$
Diseño inicial puesta a tierra:	2	Rectangular
Distancia entre conductores D:		2,81 m
Diámetro del conductor d:		0,010998 m
Profundidad cable enterrado h:		1,000 m
Factor geométrico n:		9,88154692
Tipo de mallado:	4	Picas en el perimetro
Factor Kii:		1,000
Factor Kh:		1,414
Factor Km:		0,531
Factor geométrico Ki:		2,10646894
Factor geométrico Ks:		0,356
Corriente de falta $I_G$ :		8303,93629 A
Longitud total efectiva $L_M$ :		742,41 m
Longitud total conductores $L_c$ :		567,00 m
Longitud picas total $L_R$ :		108,00 m
Longitud efectiva $L_S$ :		517,05 m
<b>Tensión de malla <math>E_m</math>:</b>		<b>912,32 V</b>
<b>Tensión de paso <math>E_s</math>:</b>		<b>877,39 V</b>

## CALCULO DE LA TENSION DE MALLA Y DE PASO

$$\zeta E_m = 912,32 < E_{touch} = 918,63 \quad ?$$

1 SI



COMPROBAR Estep

$$\zeta E_s = 877,39 < E_{step} = 3008,42 \quad ?$$

1 SI



DISEÑO PAT CORRECTO

**DISEÑO CORRECTO**